

UNIVERSIDAD DEL NORTE

DIVISIÓN DE POSTGRADOS E INVESTIGACIONES EN INGENIERÍA

DISTRIBUCIÓN DE BIENES DE AYUDA COMO RESPUESTA  
A DESASTRES NATURALES, CONSIDERANDO DIFERENTES  
PRIORIDADES DE LOS PUNTOS DE DEMANDA Y  
RESTRICCIONES DE DISPONIBILIDAD DE RECURSOS

TESIS PRESENTADA POR DANIEL ORLANDO RIVERA ROYERO  
PARA OBTENER EL GRADO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

2016

Departamento de Ingeniería Industrial

---

Aprobado por la División de Postgrados e Investigaciones en Ingeniería en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar al título de Magíster en Ingeniería Industrial.

---

Ing. Gina Galindo Pacheco.,  
Ph.D.  
Director del Proyecto

---

Ing. Rodigo Barbosa Correa.,  
Ph.D.  
Jurado

---

Ing. Miguel Jaller Martelo., Ph.D.  
Jurado

Barranquilla, Abril 2016

---

# Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y el estímulo de mi tutora y amiga, la Ing. Gina Galindo Ph.D., bajo su supervisión escogí este tema y comencé la tesis. El Ing. Rodrigo Barbosa Correa Ph.D. y Ing. Miguel Jaller Ph.D., también han sido generosamente serviciales, y me han ayudado con sus comentarios en mi anteproyecto. También me gustaría agradecerle al Ing. Ruben Yie Pinedo Ph.D., por su ayuda en la programación y aprendizaje de un lenguaje de programación conocido como Java. Es importante agradecer a la Universidad del Norte por el programa de agenda interna, el programa de merito estudiantil de la Vicerrectoria académica, que me permitió participar en la conferencia INFORMS ANNUAL MEETING 2015, en la ciudad de Filadelfia,PA., además al programa Joven Investigador de Colciencias, por el soporte que recibió esta investigación. No puedo terminar sin agradecer a Dios y a mi familia compuesta por mi madre , mi padre, mi hermano y mi abuela, por su apoyo constante, así como a mi compañera sentimental Merys Lopez.

---

## Resumen

*Esta tesis de investigación se enfoca en el problema de respuesta de un desastre natural. En ella se desarrollan dos modelos matemáticos que tienen como objetivo establecer el plan de acción para servir la demanda de la población afectada, después de la ocurrencia de un desastre natural impredecible. Los dos modelos priorizan la respuesta de acuerdo al nivel de urgencia de los puntos de demanda, además están diseñados para ser aplicados durante un horizonte de planeación y consideran restricciones de capacidad, prioridades y demandas (dinámicas para el modelo No.2). El modelo No.1 considera la disponibilidad de los bienes de ayuda para su posterior distribución y sus resultados están basados en el trabajo realizado en un artículo de investigación que está sometido en la revista Socio Economic Planning Science, mientras que el modelo No.2 considera el alistamiento de los kits y los palets antes de ser enviados. Para evaluar la aplicabilidad de los modelos, se usa un caso de estudio basado en una inundación ocurrida en Atlántico, Colombia. También se evalúa la capacidad de solución computacional de los modelos y se proponen diferentes metodologías de solución, para resolver largas instancias del problema.*

---

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>3</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>9</b>
<b>2. Planteamiento del problema</b>	<b>13</b>
2.1. Planteamiento de la pregunta problema de investigación y su justificación . . . . .	13
2.2. Descripción de la configuración del problema. . . . .	14
2.3. Justificación . . . . .	19
<b>3. Objetivos</b>	<b>22</b>
3.1. Objetivo general . . . . .	22
3.2. Objetivos específicos . . . . .	22
<b>4. Alcances y limitaciones</b>	<b>23</b>
<b>5. Marco teórico</b>	<b>24</b>
5.1. Áreas claves . . . . .	24
5.2. Estado del arte . . . . .	26
5.2.1. Análisis estado del arte . . . . .	28
<b>6. Hipótesis y Diseño metodológico</b>	<b>36</b>
6.1. Hipótesis . . . . .	36
6.2. Diseño metodológico . . . . .	36

<b>7. Formulación de los modelos</b>	<b>38</b>
7.1. Notación y Formulación matemática del modelo 1 . . . . .	38
7.1.1. Notación del modelo No.1 . . . . .	38
7.1.2. Formulación matemática del modelo No.1 . . . . .	40
7.2. Notación y formulación matemática del modelo 2 . . . . .	45
7.2.1. Notación del modelo No.2 . . . . .	46
7.2.2. Formulación matemática del modelo No.2 . . . . .	47
<b>8. Caso de estudio</b>	<b>52</b>
8.1. Descripción del caso de estudio . . . . .	52
8.2. Parámetros de entrada . . . . .	53
8.2.1. Parámetros de demanda . . . . .	56
8.2.2. Parámetro valores de prioridad . . . . .	56
8.2.3. Cadena de suministro para la distribución y parámetros de capacidad . . . . .	58
8.2.4. Parámetros de costos . . . . .	59
8.3. Proceso de decisión de los modelos . . . . .	59
8.3.1. Resultados del caso de estudio usando modelo No.1 . . . . .	60
8.3.2. Resultados del caso de estudio usando modelo No.2 . . . . .	62
8.3.3. Análisis resultados de caso de estudio en modelo No.1 y en modelo No.2 . . . . .	66
<b>9. Experiencia computacional</b>	<b>68</b>
9.1. Generación de problemas . . . . .	68
9.2. Resultados obtenidos . . . . .	69
9.3. Análisis de Sensibilidad . . . . .	72
9.3.1. Análisis del modelo No.1 . . . . .	72
9.3.2. Análisis del modelo No.2 . . . . .	73
9.4. Conclusiones de Experiencia computacional . . . . .	79
<b>10. Instancias grandes del problema</b>	<b>81</b>
10.1. Resultados de métodos de solución relacionados al modelo No.1 . . . .	85

10.1.1. Análisis y resultados de implementación de metodologías de solución No.1 y No.2 para instancias pequeñas y diferentes niveles de capital . . . . .	86
10.1.2. Análisis y resultados de implementación de metodologías de solución No.1, No.2 y No.3 para instancias largas y diferentes niveles de capital . . . . .	88
10.2. Resultados de métodos de solución relacionados al modelo No.2 . . .	90
10.2.1. Análisis y resultados de implementación de metodologías de solución No.1, No.2 y No.3 en un escenario pesimista: Mano de obra ( $\Lambda$ ) . . . . .	90
10.2.2. Análisis y resultados de implementación de metodologías de solución No.1, No.2 y No.3 en escenario optimista: Mano de obra	96
<b>11. Conclusión</b>	<b>102</b>
<b>A. Tabla Taxonómica</b>	<b>105</b>
<b>B. Datos de los parámetros caso de estudio</b>	<b>113</b>
<b>C. Pruebas de experiencia computacional en modelo No.2</b>	<b>115</b>
C.1. Pruebas MIP vs Tamaño . . . . .	115
C.1.1. Tamaño vs Función objetivo . . . . .	115
C.1.2. Tamaño vs Tiempo . . . . .	116
C.2. Parámetros MIP vs Tamaño . . . . .	116
C.2.1. Inventario vs Tiempo . . . . .	116
C.2.2. Inventario vs Función objetivo . . . . .	117
C.2.3. Capital vs Tiempo . . . . .	118
C.2.4. Capital vs Función objetivo . . . . .	118
C.2.5. Mano de obra vs Tiempo . . . . .	119
C.2.6. Mano de obra vs Función objetivo . . . . .	119
C.2.7. Factores vs Función objetivo . . . . .	120
C.2.8. Factores vs Tiempo . . . . .	121

---

<b>D. Calculo de variables de decisión</b>	<b>123</b>
D.1. Método de solución No.3 en modelo No.1 . . . . .	123
D.2. Método de solución No.3 en modelo No.2 . . . . .	125
D.2.1. Opción A: tres modelos . . . . .	125
D.2.2. Opción B: dos modelos . . . . .	127
<b>Bibliografía</b>	<b>131</b>



---

# Capítulo 1

## Introducción

La importancia del manejo de desastres es, en parte, debido al hecho de que últimamente el mundo está siendo afectado con mayor frecuencia por desastres naturales (Guha-Sapir et al.) y al impacto y las consecuencias devastadoras que traen consigo para la humanidad. Teniendo en cuenta lo anterior, durante y después de la ocurrencia de un desastre natural, el gobierno, en su deber de proteger a sus ciudadanos, tiene la obligación de auxiliar a la población afectada. Una de las formas de ayuda que se puede evidenciar por parte del gobierno, es la distribución de bienes básicos y necesarios para la supervivencia de su población. Estas operaciones no son efectuadas solo por el gobierno sino también por organizaciones no gubernamentales (ONG), tales como la Cruz Roja. Frecuentemente esta ayuda puede ser entregada en forma de kits o paquetes (Rekik et al., 2013), y pueden ser clasificados teniendo en cuenta el tipo de producto que los componga, por ejemplo: kits de alimentos, agua, higiene personal, medicamentos, entre otros.

La presente tesis tiene como objetivo atacar el problema asociado a la planeación de actividades de respuesta, es decir después de la ocurrencia un desastre natural. En esta se presentarán dos modelos matemáticos con el objetivo común de minimizar el sufrimiento humano, asociado a la demanda insatisfecha ponderada por su prioridad. La literatura asociada a la respuesta de desastre naturales posee una gran cantidad de autores y muchos de ellos se enfocan en el problema de la distribución de bienes de ayuda e.g. Barbarosoglu et al. (2004), Özdamar et al. (2004), Yi y Özdamar (2007), Yi y Kumar (2007), Sheu (2007), Lin et al. (2009b), Berkoune et al. (2012),

Lin et al. (2012), Wohlgemuth et al. (2012), y Chakravarty (2014). Un supuesto común propuesto por los autores está relacionado con la disponibilidad inmediata del inventario de los bienes de ayuda, después de la ocurrencia de un desastre.

En primera instancia, el modelo No.1 está formulado para establecer las acciones de distribución después de la ocurrencia de un desastre. Entre los supuestos principales se encuentran: (i) considerar la disponibilidad inmediata de los bienes de ayuda, y (ii) tener conocimiento previo de todo el valor de la demanda de los distintos puntos. El supuesto de disponibilidad inmediata de los bienes de ayuda es válido en los casos que exista alguna actividad de preparación previa al desastre (fuera del alcance de esta tesis). Por ejemplo estrategias de preposición de inventario como las propuestas en Akkihal (2006), McCall (2006), Ukkusuri y Yushimito (2008), Rawls y Turnquist (2010), Campbell y Jones (2011), Klibi et al. (2013), Galindo y Batta (2013a) y Duran et al. (2013). Entre las fortalezas de este modelo No.1 está la consideración de diferentes niveles de prioridad en los distintos puntos de demanda, los cuales regirán las decisiones de distribución del modelo No.1. Estos niveles de urgencia pueden ser definidos teniendo en cuenta los siguientes aspectos: (1) accesibilidad a los puntos de demanda, (2) tiempo de espera por los bienes de ayuda de las personas del punto de demanda, y (3) la importancia o urgencia del bien de ayuda. Sin embargo, este modelo No.1 se caracteriza por ser estático, debido a que no se actualizan las decisiones a lo largo del horizonte de planeación y puede aplicarse en desastres donde los cambios en el tiempo sean poco significativos como para cambiar las decisiones.

Por otro lado, para los casos en los cuales no exista ningún tipo de preparación debido a la inminencia del desastre, este supuesto de disponibilidad inmediata de los bienes de ayuda es retirado y es representado en el modelo No.2. En otras palabras, el modelo No.2 es una extensión del modelo No.1, y se trabajaría en un escenario de desastre totalmente diferente al que se propone en el modelo No.1. Eliminar el supuesto de la disponibilidad inmediata de los bienes de ayuda introduce la necesidad de ensamblar y empaquetar los kits y los palets de ayuda, antes de enviarlos a los damnificados. En consecuencia, será necesario un tiempo de alistamiento lo que afectará el tiempo total de respuesta. En cuanto a la demanda, en el modelo No.2 se supone que no se conoce en su totalidad al inicio del desastre, sino que se va conociendo a medida que va pasando el tiempo. Entre las fortalezas de este modelo

se encuentran que es un modelo dinámico y planea las acciones de empaque y distribución de los bienes de ayuda no solo durante un periodo de tiempo, sino que se puede continuar actualizando las decisiones a medida que se conoce más información, basado en un enfoque de '*rolling horizon*'. Específicamente este modelo considera las prioridades dinámicas, al igual que la actualización de la demanda y capacidades de inventarios.

También, resulta importante resaltar que estos dos modelos combinan una perspectiva estratégica con una operacional, debido a que asigna la demanda a los centro de distribución, teniendo en cuenta sus capacidades, mientras considera capacidad vehicular (en términos de número, volumen y peso), capacidad de recursos humanos (en términos de disponibilidad) y además programa el flujo de las unidades desde cada origen a cada destino, así como las decisiones para el empaque de los kits y palets en el modelo No.2.

Entre otras consideraciones de los modelos se encuentra el uso de inventarios, capacidades de vehículos y capacidades de personal (modelo No.2), así como restricciones de capital. Las características de estos modelos permiten ser usados en ciertos escenarios específicos, tales como aquellos en los que se deban tomar acciones de ayuda durante varios periodos de tiempo, puesto que no es posible servir la totalidad de la demanda en un solo día.

En forma general, una de las decisiones comunes que existe entre los modelos es establecer los puntos de demanda que se deben atender primero, basados en las distintas urgencias que puedan existir entre estos puntos. De igual manera se debe tener en cuenta que la respuesta correcta no siempre será atender a esas poblaciones con altas prioridades en un tiempo presente  $t$ , pues es necesario considerar que pueden existir otros puntos con una baja prioridad en este tiempo  $t$  pero que podrían resultar en un problema mayor en el futuro  $t + 1$ , si no son atendidas.

Con el fin de poder considerar el plan de acción propuesto en esta investigación, se asume que existe una política de cooperación entre los actores privados y los actores públicos, permitiendo el uso de los sistemas logísticos existentes en la localidad afectada. En forma de evidencia, esta idea de cooperación pública-privada, ha sido probada con éxito por WFP (World Food Programme) y TNT. En donde TNT soporta la ayuda humanitaria utilizando su cadena de suministro y llevando la comida

en todo el mundo, mientras le ayuda a WFP (Maspero y Ittmann, 2008). Por medio de esta investigación, se pretende además extender el enfoque de cooperación para responder desastres naturales de diferentes escalas (pequeña, mediana o grande), apuntando especialmente a las dos primeras, debido a que son las más comunes y generalmente no llaman la atención a las organizaciones de atención internacionales (Sodhi y Tang, 2013). Por medio de la coordinación entre los actores locales, privados y públicos, se espera mejorar la efectividad en la respuesta a los desastres naturales, así como aliviar el sufrimiento de las personas afectadas de una manera más rápida, mientras se reduce el costo asociado al despliegue logístico de esta operación.

Las características distintivas de esta investigación son: (I) cerrar la brecha encontrada por Altay y Green III (2006) y Galindo y Batta (2013b), relacionada con la disponibilidad inmediata del inventario de ayuda ante desastres naturales, reemplazando este supuesto por la necesidad de utilizar de manera efectiva los recursos disponibles, para el embalaje de los kits y los palets de ayuda, para su posterior distribución, contando con el apoyo de operadores logísticos locales y buscando reducir al mínimo el sufrimiento de las poblaciones afectadas, (II) la combinación de perspectivas estratégicas y operacionales, (III) la formulación de una función objetivo novedosa usando una distinguida función de prioridad, (IV) la formulación y aplicación de un algoritmo dinámico para resolver el problema (modelo No.2), (V) la aplicación a un caso de estudio basado en un desastre natural ocurrido en Atlántico, Colombia y (VI) el desarrollo de una serie de soluciones metodológicas que permitan resolver mayores instancias del problema, así como el diseño de importantes políticas de aplicación.

---

## Capítulo 2

# Planteamiento del problema

### 2.1. Planteamiento de la pregunta problema de investigación y su justificación

El conocimiento acerca del manejo de desastres es de gran importancia debido a que el mundo es frecuentemente afectado por desastres naturales que comúnmente producen graves consecuencias para las poblaciones vulneradas, como pérdidas humanas y de bienes materiales. De acuerdo con Kellett y Sparks (2012) solo entre los años 2000 y 2009 ocurrieron 4.484 desastres naturales que causaron 2.2 mil millones de personas afectadas, 840.000 víctimas mortales y al menos \$891 mil millones en daños económicos. Estas cifras muestran la importancia de desarrollar estrategias efectivas para reducir el riesgo y el impacto de los desastres naturales. En esta tesis se tendrán en cuenta desastres naturales de ocurrencia inminente o inesperada, y no se considerarán desastres predecibles que permitan un tiempo de anticipación de actividades. Dichas actividades iniciarán cuando ocurra el desastre natural. En otras palabras, no se realizarán actividades de *pre-desastre* sino *post-desastre*.

La importancia que han recobrado los desastres en los últimos años y la complejidad a la hora de tomar las decisiones correspondientes han impulsado a la investigación y desarrollo del campo de la gestión de operaciones en desastres (Galindo y Batta, 2013b).

Basados en el problema antes planteado surge esta propuesta de investigación que busca responder a la pregunta de **¿Cómo, por medio de la logística hu-**

manitaria y la gestión de operaciones, se puede responder efectivamente un desastre natural considerando limitaciones monetarias, de capacidad que no permiten servir la demanda en un solo día, donde el objetivo es minimizar el sufrimiento humano?

## 2.2. Descripción de la configuración del problema.

Para responder la pregunta de investigación, es necesario especificar el desastre a tratar en esta tesis se asume como inminente o impredecible. El término inminente según el diccionario de la Real Academia Española (1952), se refiere a un adjetivo que indica que amenaza o está para suceder prontamente. Por ejemplo, considere una población en temporada de lluvia y que habita cerca de un río o un gran cuerpo de agua. Suponga que en este cuerpo de agua, existen niveles de altura muy elevados o fisuras y fallos irreparables en alguna parte del dique de protección.

Para el escenario asociado al modelo No.1, se asume que previamente se realizaron estrategias de preparación, como pre-posición de inventario que garantiza la existencia del inventario de los bienes de ayuda y solamente es requerido distribuirlos. Mientras que para el modelo No.2, se considera el desconocimiento las características de riesgo antes mencionadas por parte del gobierno, por lo que el desastre sólo puede ser previsto justo antes de que ocurra, sin dar tiempo a actividades de preparación. Este último planteamiento se ha presentado y es común en países en vía de desarrollo, especialmente en poblaciones apartadas de epicentros urbanos.

La situación que se plantea para el modelo No.2 es un ejemplo de un desastre que puede llegar a ser incontrolable, ya que el tiempo en el que se conoce la situación resulta ser un factor en contra para las actividades de preparación y la única opción que queda es responder para ayudar la población afectada, buscando hacerlo de una forma rápida y que intente disminuir el sufrimiento de las personas que hacen parte de la población.

El inicio o el detonador de las actividades de respuesta en los dos modelos propuestos es la ocurrencia del desastre, pero la diferencia entre los dos modelos consiste en que el modelo No.2 inicia con las actividades de empaque de la ayuda en forma de kits y palets, para su posterior entrega a la comunidad afectada. En contraste, el

modelo No.1 inicia con las actividades de distribución de la ayuda inmediatamente ocurre el desastre.

En cuanto al horizonte de planeación se propone un tiempo de actividades de tres días o de 72 horas, pero este podría extenderse en el modelo No.2, de acuerdo a las condiciones del sistema y las necesidades del tomador de decisiones. Para el algoritmo dinámico del modelo No.2, se propone dividir el horizonte de planeación en periodos de tiempos de 18 horas por cada iteración del algoritmo dinámico y a su vez se propone la división del horizonte de planeación en ventanas de operaciones (VO) discretas de 6 horas, con el supuesto de que cada 6 horas se puede conocer nueva información referente al estado de la zona afectada y cambiar las decisiones si es necesario, basado en el enfoque de *rolling horizon*.

En cuanto a los palets en consideración, estos estarán compuestos por un solo tipo de kit y cada kit estará conformado por un conjunto de productos de la misma clase o familia. El problema en estudio incluye una red como la que se observa en la Figura 2.1, donde se pueden encontrar los distintos nodos que son considerados como: Centro de Distribución (CD), Punto de Demanda (PD) y Punto de Transferencia (PT).

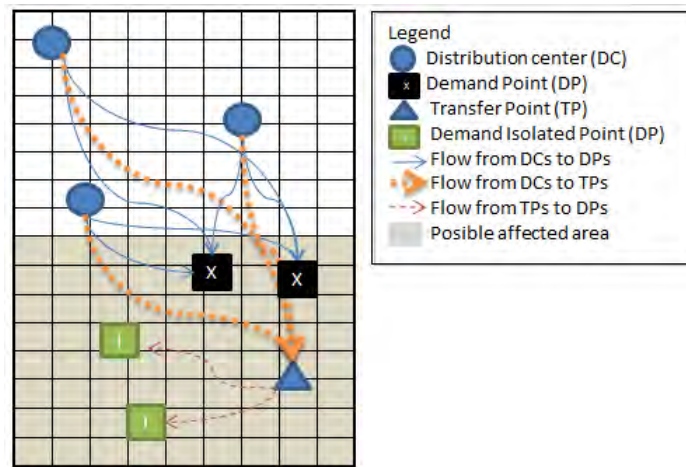


Figura 2.1: Descripción del problema

En esta tesis se asume la existencia de un acuerdo previo con una corporación privada, la cual garantiza los siguientes beneficios **para el escenario** del modelo No.2: (i) disponibilidad de los productos que manejan dentro su cadena de suministro, (ii) las bodegas o centros de distribución (CD) ubicados cerca de la zona afectada, (iii)

un número limitado de vehículos con diferentes capacidades ubicados en los CD, (iv) un número limitado de personal con ciertas capacidades para la preparación de los kits de ayuda y los palets y (v) rotación del inventario de los productos. Por otro lado, en escenario del modelo No.1 no se considera el beneficio (i), el que refiere a la disponibilidad de productos, en vez de eso se considera la disponibilidad inmediata de los palets de ayuda para su posterior distribución, igualmente el modelo No.1, no considera el beneficio (iv), debido a que no requiere de personal para empacar los kits y los palets, a causa de la existencia inmediata del inventario de palets. El supuesto de la existencia previa de un acuerdo con una corporación privada no es imprescindible, pues este estudio también podría aplicarse a redes logísticas compuestas por organizaciones humanitarias tales como las ONG, pero la característica que convierte esta opción en una decisión ventajosa, está relacionada al beneficio (v), pues con esto se espera evitar un problema común relacionado a la pérdida de productos por su deterioro. En modo de ejemplo, [Horwitz \(2009\)](#) explica la importancia de que el sector público imite las prácticas de Wal-Mart, porque Wal-Mart y otras empresas privadas jugaron un rol extraordinariamente efectivo en el proceso de ayuda en el Huracán Katrina. De acuerdo a [Horwitz \(2009\)](#), esto fue resultado de incentivos, conocimientos y rutinas organizacionales superiores que son causadas por la propiedad privada y los mercados competitivos.

Por otro lado, con referencia a la estructura o el diseño de la cadena de suministro que apoya la ayuda humanitaria, se asume que esta cadena de suministro posee un sistema de 'Cross-docking' y por esta razón existe un centro de distribución principal (CDP) con una capacidad elevada de inventarios (infinita) y otros CD con bajas capacidades. En cuanto a la prestación del servicio de ayuda, se consideran la siguiente característica: todos los puntos de demandas y puntos de transferencia pueden ser servidos por los CD o por el CDP. En la configuración del problema, se asume que los *CDs* están localizados cerca a los *PDs*. Además, se asume que cada *CD* es un almacén con capacidad limitada, un cierto número de vehículos y una cantidad de personal disponible para actividades de empaque (modelo No.2). Debido a las limitaciones en inventario, capacidades vehiculares y de mano de obra (modelo No.2), no es posible servir toda la demanda en un solo día. En otras palabras, se requieren varios periodos de tiempo para atender el total de la población afectada.



Los puntos de demanda en esta red corresponden a refugios localizados en las ciudades o pueblos dentro de la zona afectada. Se asume que el sistema de transporte es precario y es probable que algunos *PDs* resulten inaccesibles por medios de transportes regulares. En otras palabras esos *PDs* pueden ser considerados como aislado o no aislados. Un punto aislado es un punto que llega a ser altamente inaccesible a través de la red de transporte regular debido a alguna ruptura o falla a causa del desastre. En el caso de una inundación sería como considerar un pueblo al cual no se pueda acceder por tierra debido a que sus vías de acceso se encuentran inundadas. En otras palabras mientras que las personas ubicadas en los puntos de demanda no aislados reciben la ayuda por vehículos regulares directamente provenientes de los centros de distribución, las personas aisladas reciben su ayuda por medio de vehículos especiales, como botes o helicópteros, que son enviados a través de puntos de transferencia, donde la ayuda es transferida de los vehículos regulares provenientes de los centros de distribución a estos vehículos especiales. Esta población está distribuida por medio de distintos *PDs*. Se asume que no todos los *PDs* tienen la misma urgencia para recibir los bienes de ayuda. Esto significa que ciertos *PDs* requerirán mayor rapidez en su atención que otros. También se asume que la urgencia por recibir atención es dinámica. De esta manera, un *PD* que podría no ser prioridad en tiempo  $t$  pero, si no es atendido, podría tener una mayor prioridad en el periodo de tiempo  $t' > t$ .

Debido a que estos modelos están pensados para ser aplicados en un ambiente humanitario, se ha decidido perseguir un objetivo humanitario. En este caso, el objetivo es minimizar la demanda que se mantiene insatisfecho ponderada, donde la ponderación de la demanda está dada por unas valores de prioridad. Estos valores pueden ser obtenidos por una función de prioridad para cada punto, y representará la relevancia o importancia de satisfacer la demanda un determinado *PD*. Este enfoque es soportado por el hecho que en la Logística Humanitaria, conocer los valores de la demanda no es suficiente, desde que es relevante relacionar esos valores de demanda a necesidades individuales de los individuos de una población afectada (Hilhorst, 2005). En la literatura la urgencia es representada en diferentes maneras por ejemplo: (i) jerarquía por Özdamar y Demir (2012), y (ii) prioridad por Holguín-Veras et al. (2013).

Se deja la definición de la función de prioridad abierta al usuario. Sin embargo, en la concepción dicha función de prioridad debería considerar al menos los siguientes aspectos: (1) las características de los puntos de demanda (aislado o no aislado), (2) el tiempo en que un punto de demanda ha estado esperando por ser servido, y (3) el tipo de bien de ayuda solicitado por el punto de demanda. También, este valor de prioridad debe cambiar a medida que el tiempo pase dependiendo de las condiciones de cada punto de demanda. Por ejemplo, considere un *PD* no aislado cuya función de prioridad es muy baja al inicio del horizonte de planeación. Mientras la demanda de este punto no sea satisfecha, su prioridad incrementaría a través del horizonte de planeación. La idea es considerar los valores de prioridad de cada *PD*, con el fin de decidir a cuál de ellos servir después. Notar que se espera que, a medida que el tiempo pase, el sufrimiento humano (definido en la función objetivo) debería decrecer para un *PD* que ha sido servido. En el caso de estudio se provee un ejemplo de una posible función para computar los valores de prioridad.

A pesar de que se persigue un objetivo social, es necesario tener en cuenta el costo logístico incurrido en la operación de ayuda. Dichos costos incluyen los siguientes: (a) el costo de transporte de cada vehículo que parte desde un *CD* hasta un *PD* no aislado o un *PT*, (b) el costo de transporte desde cada *PT* a cada *PD* aislado, (c) el costo de adquisición de los productos, y (d) el costo asociado al personal requerido para armar los kits y los palets (solo para el caso del modelo 2). La forma de incluir este costo logístico en el modelo de programación es a través de una restricción de capital. Este enfoque de restricción busca reflejar situaciones como en las que el gobierno estipula una cantidad específica de recursos para responder a un desastre natural.

Con respecto a las capacidades financieras, es poco probable que se tenga una cantidad de recursos financieros infinitos, es decir que es muy razonable asumir que las autoridades destinan una cierta cantidad de dinero para atender las víctimas de un desastre. Por ejemplo, el gobierno chino destinó 300 millones de yuanes (47 millones de dolares) para contribuir a los esfuerzos de ayuda en Guangdong y Guangxi, los cuales fueron azotados por un Tifón, así como para atender la población en Inner Mongolia y Shanxi, los cuales sufrieron una situación de sequía (desde [http://www.chinadaily.com.cn/china/2015-10/27/content\\_22300065.htm](http://www.chinadaily.com.cn/china/2015-10/27/content_22300065.htm)). De esta

manera, se asume que se cuenta con una cantidad limitada de recursos financieros para realizar las acciones de ayuda.

La solución que se espera obtener de cada uno de los modelos son: (i) para el modelo No.1, el plan de distribución de la ayuda, mientras que (ii) para el modelo No.2, el plan dinámico de embalaje de los productos de ayuda y su posterior entrega a los puntos de demanda en cada periodo del horizonte del planeación. Ambos modelos consideran la asignación de las demanda de distintos *PDs* a *CDs* y a *CDP*. También define la cantidad de viajes que cada vehículo regular y especial debería realizar desde su origen correspondiente hasta su destino, con el fin de satisfacer la demanda y considerando sus limitaciones.

En consecuencia, entre las variables de decisión de los modelos de esta tesis se encuentran: (1) el número de viajes desde los CD o PT, hasta puntos de demanda, (2) la cantidad de cada tipo de palets en cada viaje realizados en cada periodo del horizonte de planeación, (3) la cantidad de inventario a mantener en los puntos de transferencia, (4) el número de kits y palets a armar, y (5) la cantidad de equipos de trabajo a contratar para la realización de los kits de ayuda y los palets para el transporte de los kits. El modelo No.1, solo considera las tres primeras variables, el modelo No.2 considera todas las enunciadas anteriormente.

Adicionalmente, como el modelo No.2 está pensado para ser aplicado bajo un escenario de '*rolling horizon*', sí se asume que se está en un periodo de tiempo  $t_0$  y que se resuelve el problema considerando el horizonte de planeación que va desde  $t_0$  hasta  $t_n$ . Entonces, cuando se está en el periodo de tiempo  $t_0 + 1$ , que se podría llamar,  $t'_0$ , i.e. el nuevo tiempo actual  $t'_0$ , se resuelve el problema nuevamente con alguna información actualizada, bajo un nuevo horizonte de planeación que iniciaría desde el periodo de tiempo  $t'_0$ . (Ver Figura 2.2).

## 2.3. Justificación

### ■ Teórica

En términos teóricos el problema de distribución de bienes de ayuda se relaciona con un problema de optimización logístico que involucra la asignación de puntos de demanda a centros de abastecimiento, asignación de vehículos,

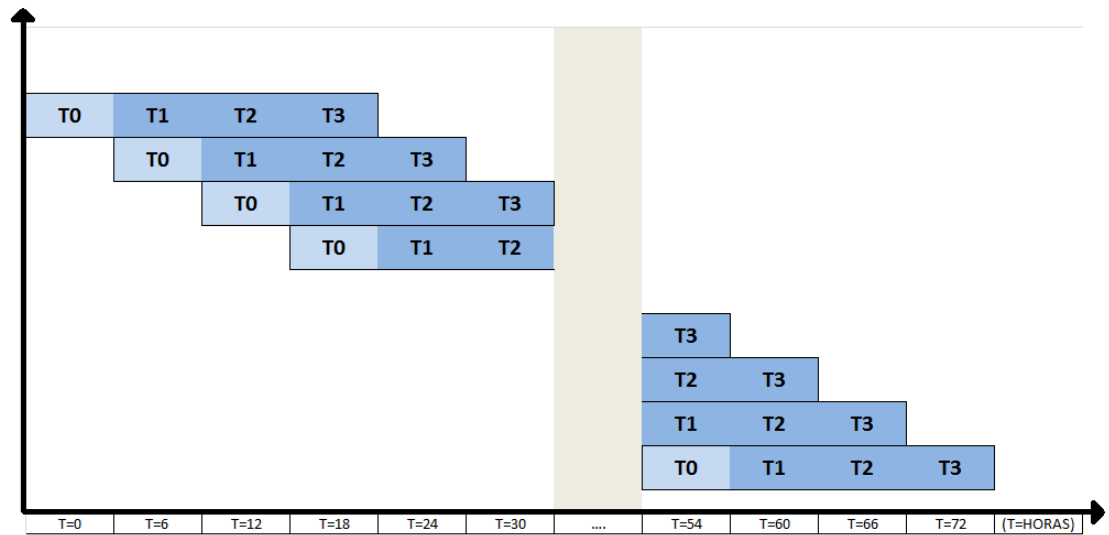


Figura 2.2: Ilustración de las decisiones en el algoritmo dinámico basado en el enfoque *rolling horizon*

programación de la producción, análisis de cadena de suministro e incluso se puede incluir análisis de localización, entre otros. Estos problemas normalmente manejan variables enteras y además son problemas catalogados como NP-hard, debido a la alta dificultad para obtener su solución a través de un algoritmo que lo resuelva de una manera óptima en un tiempo polinomial. Para la solución de estos problemas existen métodos exactos aplicables a problemas pequeños y métodos que ayudan a buscar soluciones aproximadas. Entre los métodos de solución exacta está el método de ramificación y acotamiento, relajación Lagrangeana, entre otros. Por otro lado también se han aplicado métodos heurísticos o meta-heurísticos que proporcionan buenas soluciones en un tiempo razonable, pero no necesariamente se obtienen los óptimos globales.

## ■ Práctica

En el proceso de entrega de ayudas después de los desastres naturales, la asignación de los puntos de demanda a centros de abastecimiento es una decisión muy importante, pero puede resultar más complicada debido a ocurrencia de situaciones inesperadas, como bloqueos de vías o fallos en las vías de acceso, lo que puede traer consigo, la necesidad de usar otros medios de transporte

alternativos que permitan llegar al lugar afectado y así atender la demanda de ayuda de la población damnificada. Dependiendo del tipo de desastre natural, es necesario contar con un conjunto de alternativas en cuanto a modos de transporte, vías de apoyo y planes. Otro enfoque práctico utilizado en esta tesis, se refiere a tratar de encaminar las acciones de ayuda basados en la existencia de prioridades entre los distintos puntos de demanda a causa de distintas condiciones de emergencia. Se resalta su aplicación en el modelo No.1, por que este es el punto de partida de esta tesis, para su posterior extensión en el modelo No.2. Los dos modelos planteados tienen en cuenta la misma función objetivo que guía las decisiones de acuerdo a distintos niveles de prioridad establecidos por una función de urgencia pre-establecida. Por otro lado, es importante remarcar el hecho de que se pretende cerrar la brecha encontrada por [Altay y Green III \(2006\)](#) y [Galindo y Batta \(2013b\)](#), correspondiente a la disponibilidad inmediata de los bienes de ayuda. A partir de este punto se incluye la discusión referente a la necesidad de tener en cuenta un tiempo de alistamiento asociado a las actividades de embalaje de los kits y los palets de ayuda antes de ser distribuidos, como se maneja en el modelo No.2. Además, el modelo No.2 actualiza las decisiones de una forma dinámica, tomando como base los cambios en la demanda y las capacidades del sistema como podría ocurrir en los desastres naturales. Las razones mencionadas anteriormente destacan la relevancia de los modelos de toma de decisiones, como dos prototipos inteligentes para responder de manera efectiva y humana un desastre natural.

A pesar de que en la actualidad existen grandes organizaciones internacionales como la Cruz Roja y Media Luna con unos planes de contingencia prácticos para responder un desastre natural, el enfoque que se busca establecer en esta tesis está relacionado especialmente en servir de apoyo en la respuesta de los desastres, utilizando recursos privados y públicos, cuando los desastres naturales sean de gran magnitud o cuando estos no llamen la atención de las grandes *ONGs*.

---

## Capítulo 3

### Objetivos

#### 3.1. Objetivo general

Diseñar modelos que sirvan como base para definir estrategias para responder a desastres naturales donde se considere el modelado una tasa de empaque y la asignación de puntos de demanda a centros de distribución, apoyados de las plataformas logísticas existentes, como medida de respuesta para desastres naturales, con caso de aplicación en el departamento del Atlántico.

#### 3.2. Objetivos específicos

- Diseñar modelos de programación matemático que tengan en cuenta las características del problema, así como las capacidades y los medios de transportes de la cadena logística establecida.
- Evaluar la capacidad del modelo propuesto para la solución de problemas relativamente grandes y, si se considera, necesario diseñar y establecer métodos no exactos para estos casos.
- Validar el método de solución por medio de una evaluación del desempeño en cuanto a la calidad de soluciones y su tiempo de ejecución.

---

## Capítulo 4

### Alcances y limitaciones

- Se asume que la función de prioridad debe ser establecida por el usuario.
- La función de prioridad que se usa en este documento está diseñada para manejo continuo, pero fue usada una aproximación de esta función de manera discreta.
- Los datos de la función objetivo del caso de estudio son solo para fines ilustrativos.
- Solo se trabaja con máximo dos tipos de palets, dos tipos de kits, un máximo de 20 tipos de productos, y dos tipos de vehículos.
- La licencia de IBM ILOG CPLEX 12.6.0, y la memoria del computador portátil DELL Inspiron 14z utilizado, limitó el calculo de algunas operaciones.

---

# Capítulo 5

## Marco teórico

### 5.1. Áreas claves

- **Logística Humanitaria:** A partir de los grandes desastres naturales ocurridos en los últimos años, como los son el tsunami en indonesia en el 2004, el huracán Katrina en el 2005, el terremoto en Haití, el desastre ocurrido en Japón en el 2011, así como el terremoto en Nepal en 2015 y en Ecuador en el 2016, ha sido necesario la investigación académica de las operaciones logísticas en situaciones humanitarias, y en consecuencia se ha incrementado el interés en estudiar la logística humanitaria por medio de la investigación de operaciones ([Altay y Green III, 2006](#)) y ([Galindo y Batta, 2013b](#)).

Según [Maspero y Ittmann \(2008\)](#), la logística humanitaria se diferencia de la logística comercial en varios aspectos, como lo son: (i) los patrones de la demanda en la logística humanitaria son desconocidos, (ii) los tiempos de respuestas en la logística humanitaria deben aproximarse a cero, pues de esto depende la vida de muchas personas, (iii) los sistemas de información son poco probable que existan o pueden haber sufrido problemas por el desastre natural, en la logística humanitaria y además (iv) el objetivo de las cadenas humanitarias es primordialmente minimizar el sufrimiento de las personas o salvar más vidas, mientras que la logística comercial busca minimizar costos o maximizar ganancias. Por otro lado el estudio de la logística humanitaria se puede clasificar por la etapa del desastre que se enfoca el investigador, puede ser la mitigación, la



preparación, la respuesta y la recuperación (Rawls y Turnquist, 2010). Esta propuesta se enfoca en la etapa de respuesta, debido a que se busca por medio de la disponibilidad de los productos, empaquetar los kits y los palets de ayuda, para su posterior distribución a medida que el desastre ocurra y se encuentren establecidos los puntos de demanda.

- **Modelos de Transporte y de asignación:** Los modelos de transporte reciben el nombre debido a que muchas de sus aplicaciones involucran determinar la manera óptima de transportar bienes (Hillier y Lieberman, 2002). Estos problemas se convierten en la elección de la mejor combinación entre un destino y un punto de partida, entre un conjunto de rutas posibles, teniendo en cuenta factores como costo, tiempo, entre otros. En particular, según Hillier y Lieberman (2002): el problema general de transporte se refiere a la distribución de cualquier bien desde cualquier grupo de centros de suministro, llamados orígenes, a cualquier grupo de centros de recepción, llamados destinos, de tal manera que se minimicen los costos totales de distribución. Debido a que este modelo puede ajustarse a problemas que muchas veces no involucran el transporte, lo convierte en un tipo especial de problema y de los más importantes en la programación lineal. Este problema de transporte también puede tener aplicación en problemas enteros y si los parámetros del modelo no son enteros, podrían aumentar la complejidad al momento de obtener la solución exacta del problema usando técnicas de programación lineal. El problema de distribución de bienes, está relacionado con la logística humanitaria en la etapa de respuesta de un desastre natural, pues se refiere a la estrategia de entregar los productos de ayuda a las personas afectadas durante y después de haber ocurrido el desastre natural (McLoughlin, 1985). Por otro lado el problema de asignación es un tipo especial de problema de programación lineal en el que son asignados recursos a la realización de tareas (Hillier y Lieberman, 2002). Por ejemplo, en esta tesis se relaciona a la asignación de los trabajadores a realizar las tareas correspondientes a empaquetar los kits y los palets. Debido a que las variables en este caso son personas, pueden ser clasificadas como enteras, razón por la cual se aumenta la complejidad al momento de optimizar la respuesta del modelo. Muchos autores han dedicado a su estudio a la logística humanitaria y

las diferencias normalmente están en los objetivos que persiguen, así como las restricciones que emplean y los métodos de solución que proponen. Entre ellos se encuentran Tzeng et al. (2007), Lin et al. (2011), Berkoune et al. (2012), y Abounacer et al. (2014).

### ■ Programación Lineal y Entera

Dentro de la Investigación de Operaciones se encuentra la rama de la Optimización que permite minimizar o maximizar una *Función Objetivo*, que se encuentra restringida por una serie de ecuaciones y/o inecuaciones, que permiten definir un espacio de solución factible. De los distintos problemas que se pueden encontrar, existen problemas con espacio de solución continuas o discretas (Hillier y Lieberman, 2002). Los problemas con espacios de soluciones continuos son conocidos, como problemas de programación lineal (LP: Linear Programs) y pueden ser resueltos por métodos exactos, como el algoritmo Simplex; mientras que los problemas con espacios de soluciones discretos son problemas que debido a la complejidad que poseen, han sido objeto de gran cantidad de investigaciones y pueden ser clasificados como:

- Programas Enteros Mixtos (MIP: Mixed Integer Programs): Este tipo de problemas están compuestos por variables enteras y variables continuas
- Programas Enteros (IP: Integer Programs): Están compuestos únicamente por variables enteras
- Programas Binarios (BIP: Binary Integer Programs): Todas las variables son enteras restringidas a valores 0 – 1

Como se mencionó antes el problema en contexto puede utilizar variables con características discretas, lo cual podría hacer necesario el uso métodos de solución para problemas de programación entera.

## 5.2. Estado del arte

El principal tema de investigación en esta tesis es el manejo de desastres (Emergency management), investigación que ha sido dividida en cuatro fases principa-

les, que son: mitigación, preparación, respuesta y recuperación, según McLoughlin (1985). La fase en estudio de esta tesis es la respuesta. A causa de que se busca realizar acciones durante y después de la ocurrencia del desastre, como lo es el alistamiento de los kits y los palets de ayuda, para su posterior envío a las personas afectadas. Una primera revisión literaria completa de este tema fue realizada por Altay y Green III (2006), donde se revisaron los artículos relacionados a la logística humanitaria y las cuatro fases de los desastres naturales, desde 1980 hasta 2004. De igual manera Galindo y Batta (2013b), complementaron el trabajo desde el 2005 hasta el año 2012, encontrándose un crecimiento en el número de contribuciones al tema en discusión. En esta revisión de literatura se realizó una búsqueda exhaustiva de artículos escritos en su mayoría en el idioma inglés, a través de las bases de datos de la UNIVERSIDAD DEL NORTE y la plataforma 'Google Scholar'. La metodología de búsqueda se puede describir de la siguiente manera, primero a través de 'Google Scholar' se buscaban los artículos con palabras claves como: 'humanitarian logistics', 'responding a natural disaster', entre otros. Dentro de la extensa lista de posibles artículos, se escogían los de mayor similitud al problema planteado en esta tesis, en cuanto al título y al resumen. Luego se leían los artículos con mayor relevancia y por medio de la bibliografía de los artículos leídos, se iba obteniendo la información que guiara a la fuente del conocimiento relacionado al tema en contexto. Algunos artículos poseían en su revisión literaria clasificaciones taxonómicas, como lo son los trabajos de Blecken et al. (2010), De la Torre et al. (2012), Caunhye et al. (2012) y Holguín-Veras et al. (2013). Estos artículos sirvieron de guía para completar el estado del arte, ya que en la presente tesis fue usada la clasificación taxonómica para la organización de la literatura de los problemas de respuesta de los desastres naturales, teniendo en cuenta la gestión de operaciones y la logística humanitaria. Por otro lado, es importante decir que también se incluyó en la búsqueda, artículos relacionados a la etapa de preparación, así como artículos que combinaran la preparación y la respuesta; debido a que se aspiraba saber si la estrategia alistamiento de kits o palets había sido utilizada como medida de preparación. En el proceso de búsqueda resultó necesario la remisión a revistas científicas o de investigación como: Public Administration Review, European Journal of Operational Research, Management Science Transportation Research, Safety Science, Journal of the Operational

Research Society, Annals of operations research, Eastern Asia Society for Transportation Studies, Networks and Spatial Economics, Springer US, International Journal of Logistics: Research and Applications, Journal of Intelligent Transportation Systems, Socio-Economic Planning Sciences, Computers & Operations Research, Computers & Industrial Engineering, Journal of Homeland Security and Emergency Management, tesis de maestrías y doctorados, entre otros. La revisión del estado del arte de esta tesis, considera los trabajos publicados hasta el primer semestre del año 2016 y dentro de la clasificación utilizada en forma taxonómica, se establecen: las etapas del desastre natural en estudio (preparación, respuestas o la combinación de preparación y respuesta), el tipo de modelo en estudio, su método de solución y el número de funciones objetivos, e igualmente la información del año de publicación y el nombre de los autores. (Ver Tabla A.1 en Apéndice A).

### 5.2.1. Análisis estado del arte

La revisión de literatura puede ser clasificada en dos grandes grupos basados en el objetivo que persigan (Holguín-Veras et al., 2013): (1) artículos cuyo objetivo está principalmente basado en eficiencia operacional, como minimización de costos, y (2) artículos que consideran objetivos humanitarios como minimización del sufrimiento humano.

En análisis de la literatura que se presenta en esta sección, solamente se discuten los artículos pertenecientes al segundo grupo, donde se encuentran los siguientes artículos: Berkoune et al. (2012), Özdamar et al. (2004), Yi y Özdamar (2007), Yi y Kumar (2007), Lin et al. (2009b), Wohlgemuth et al. (2012), Dessouky et al. (2006), Sheu (2007), Sheu (2010), Bertsimas et al. (2011), Lin et al. (2011), Chakravarty (2014), Pérez-Rodríguez y Holguín-Veras (2015), Ahmadi et al. (2015), Buzón-Cantera et al. (2015) y Duhamel et al. (2016). También se revisaron artículos con funciones multi-objetivos que incluyen tanto objetivos operacionales, como humanitarios, dentro de los cuales se incluyen los siguientes: Lin et al. (2009a), Tzeng et al. (2007), Abounacer et al. (2014), Huang et al. (2012), Zhan et al. (2014), Clark y Culkin (2013), Balcik et al. (2008), Rottkemper et al. (2012), Yuan y Wang (2009) y Huang et al. (2015).

### Artículos con funciones objetivo humanitarias

En Berkoune et al. (2012), los autores definen y formulan un problema de transporte práctico, donde el objetivo es minimizar el tiempo de respuesta. Los autores desarrollan un algoritmo genético eficiente para representar situaciones realistas. Özdamar et al. (2004) discute un problema de transporte dinámico, donde el objetivo es minimizar la demanda insatisfecha de cada tipo de bien de ayuda en un horizonte de planeación. El resultado de su modelo es un plan logístico de emergencia que puede ser actualizado con base en la información adicional de acuerdo a nuevas demandas de bienes de ayuda, y disponibilidad de provisiones, así como modos de transporte. En Wohlgemuth et al. (2012) se considera la aplicación de un problema de ruteo y programación. Este enfoque evalúa los beneficios de la optimización dinámica anticipando los tiempos de viaje variables. El objetivo es evitar retrasos e incrementar el uso de los equipos.

En Yi y Özdamar (2007) los autores describen un modelo de localización-distribución integrado para coordinar el soporte logístico y la evacuación en la respuesta de desastre minimizando la suma ponderada de personas esperando en puntos de demanda, temporales o permanentes. Un trabajo similar está dado en Yi y Kumar (2007), donde se presenta una meta-heurística de colonia de hormiga para resolver problemas logísticos que surgen en las actividades de ayuda en desastres. El plan incluye despachar los productos a los centros de distribución en la zona afectada y llevar al personal herido a centros médicos con el objetivo de minimizar la suma ponderada de la demanda insatisfecha.

En un enfoque diferente del mismo problema, los autores en Lin et al. (2009b) presentan un modelo que busca minimizar el costo de penalización incurrido por la demanda insatisfecha. Otro artículo que se enfoca en la demanda insatisfecha es el dado por Dessouky et al. (2006), donde los autores presentan modelos para resolver la localización de los almacenes y el ruteo de vehículos para responder emergencias de gran escala, con el objetivo de minimizar la demanda insatisfecha.

Uno de los objetivos humanitarios que pueden ser encontrados en la literatura disponible está relacionado con la equidad y la justicia, el cual es considerado en Bertsimas et al. (2011). En este artículo, los autores usan un concepto ' $\alpha$ -fairness' para definir su función objetivo. Los autores en Lin et al. (2011) también usan una fun-

ción de equidad relacionada a la satisfacción de la demanda en su función objetivo. En otro interesante artículo, [Chakravarty \(2014\)](#) estudia un enfoque en dos etapas proactivo/reactivo donde el tiempo de respuesta y la cantidad de ayuda es determinada después de que el desastre ocurre y el inventario pre-posicionado es determinado antes de que el desastre ocurra, con el objetivo de maximizar el valor social.

A pesar del hecho de que las funciones objetivos mencionadas anteriormente son apropiadas y convenientes, algunos investigadores han considerado que lo que más importa en el manejo de desastre es la minimización del sufrimiento humano. Para alcanzar este objetivo, algunos autores han definido niveles de prioridad o urgencia entre la población afectada, con el fin de servir primero a esas personas que tienen mayor prioridad o mayor urgencia de ser servidos. Este enfoque puede encontrarse en artículos como [Sheu \(2007\)](#) y [Sheu \(2010\)](#), entre otros. En [Sheu \(2007\)](#) el autor determina las prioridades de distribución usando un enfoque de agrupamiento híbrido difuso. Este trabajo es extendido en [Sheu \(2010\)](#), en el cual el autor diseña un sistema de gestión de la demanda que trabaja con datos en tiempo real, donde los parámetros de demanda y prioridades son actualizados a medida que el tiempo pasa. Por otro lado, en [Pérez-Rodríguez y Holguín-Veras \(2015\)](#), se diseñó un modelo matemático de asignación y ruteo para responder un desastre natural y busca minimizar los costos sociales, los cuales incluyen los costos logísticos y los costos de privación. En este caso el modelo resultante fue no lineal y para solucionar el problema, en la disertación doctoral [Perez Rodriguez \(2011\)](#) aplicó relajación Lagrangeana. Además, se realizaron múltiples análisis interesantes con respecto a los resultados obtenidos y los beneficios al usar los costos de privación para manejar problemas de logística humanitaria. En otro artículo [Ahmadi et al. \(2015\)](#), propone un modelo de ruteo y localización, con múltiples depósitos considerando fallas en la red, múltiples usos de vehículos y un tiempo de ayuda estándar. El modelo determina la ubicación de los depósitos y la designación de rutas para la distribución de la última milla, después de un terremoto. Un algoritmo de búsqueda en vecindario es diseñado para resolver el modelo determinista. Por otro lado [Buzón-Cantera et al. \(2015\)](#), en este artículo busca modelar el problema de distribución de ayuda humanitaria, en búsqueda de satisfacer las necesidades de la población después de la ocurrencia del desastre. La metodología de solución propuesta incluye un algoritmo de optimización híbrido,

que combina programación lineal entera y la heurística de recocido simulado, la función objetivo es minimizar las penalidades debido a demoras y al mismo tiempo minimiza la distribución no balanceada. Por último, [Duhamel et al. \(2016\)](#) propone un modelo matemático y heurísticas para resolver un problema de localización y asignación multi-periodo. Los autores en [Duhamel et al. \(2016\)](#), proponen un modelo no lineal que es resuelto con un enfoque de descomposición, el problema maestro se resuelve usando un algoritmo de solución a problemas no lineales, mientras que el sub-problema es resuelto por una heurística 'black-box' y una búsqueda local de vecindario descendente variable. La función objetivo considera maximizar el tamaño de la población al final del periodo, basados en que existe una tasa de supervivencia en una población que posee un comportamiento no lineal. En [Duhamel et al. \(2016\)](#), existen, capacidades de recursos humanos, inventario, y capital.

### Artículos con múltiples objetivos: costos y objetivos humanitarios

Los artículos descritos anteriormente son todos mono-objetivos. En contraste, se encontraron otros artículos que han propuestos modelos multi-objetivos donde combinan objetivos de eficiencia operacional y objetivos humanitarios.

En [Lin et al. \(2009a\)](#), los autores estudian un problema multi-producto, multi-modo de transporte y multi-periodo usando dos enfoques heurísticos para resolver un problema logístico, el cual considera tres funciones objetivo: (1) minimización de la demanda insatisfecha, (2) minimización del tiempo de viaje total para todos los tours y todo los vehículos, y (3) minimización de la diferencia en la tasa de satisfacción entre los grupos. En [Tzeng et al. \(2007\)](#), los autores minimizan el costo total y el tiempo total de viaje, mientras maximiza la mínima satisfacción de la demanda durante el periodo de planeación. En este caso los autores usaron una programación multi-objetivo difusa. En [Abounacer et al. \(2014\)](#), los autores minimizan tres objetivos: (1) tiempo de transporte total, (2) número de primeros auxilios necesarios, y (3) cantidad de demanda no cubierta. En [Huang et al. \(2012\)](#), los autores investigan métricas de eficiencia, eficacia y equidad en operaciones de ayuda. En [Zhan et al. \(2014\)](#), los autores consideraron tres objetivos: (1) minimizar tiempo total, (2) minimizar demanda insatisfecha, y (3) minimizar costo total. Los autores en este último artículo se enfocaron en un problema de asignación de logística humanitaria

con múltiples proveedores, múltiples áreas afectadas, múltiples productos y múltiples vehículo. El modelo en este caso está basado en actualizaciones de información en el escenario del desastre, en un intento por coordinar eficiencia y equidad. La principal contribución de Zhan et al. (2014) es resolver el problema de asignación con toma de decisiones estadística y análisis secuencial de Bayes. En Clark y Culkin (2013) los autores consideran la minimización de dos objetivos, (i) la demanda insatisfecha y (ii) los costos logísticos relacionados a transporte y control de inventario.

En Balcik et al. (2008), los autores proponen un modelo de programación entero mixto que determina la programación de envío de vehículos y la asignación equitativo de recursos, basados en los proveedores, capacidades de vehículos y restricciones de tiempo de entrega, con los objetivos de minimizar el costo de transporte y maximizar los beneficios de los receptores de ayuda. Su modelo considera el problema de ruteo en la etapa final de una cadena de ayuda humanitaria usando el problema del agente viajero. En Rottkemper et al. (2012), los autores proponen un modelo de programación entero mixto con dos objetivos usando un 'rolling horizon', pero los objetivos son (1) minimización de demanda insatisfecha y (2) minimización de costos. Los autores en Rottkemper et al. (2012) desarrollan un análisis de sensibilidad de los costos de penalización; que fue introducidos por las demandas insatisfechas ciertas y las demandas inciertas consideradas en el modelo. En Huang et al. (2015) se formulan tres funciones objetivos, como principios humanitarios: (i) utilidad de salvar vidas, (ii) costo de demora y (iii) justicia. Se desarrolló un modelo de optimización multi-objetivo integrado que combina asignación de recursos con distribución de emergencia. Además, se utilizó un enfoque de 'rolling horizon' para incorporar la actualización de la información y de las decisiones. Los autores en Huang et al. (2015) diseñaron un algoritmo de desigualdad en varianza.

Finalmente, los autores en Yuan y Wang (2009) presentan dos modelos matemáticos para selección de caminos en la gestión logística de emergencia. El objetivo en Yuan y Wang (2009) es minimizar el tiempo de viaje a través del camino. El segundo modelo es un modelo multi-objetivo que considera caos, congestión y pánico, y los objetivos son: (i) minimizar tiempo de viaje total, y (ii) minimizar la complejidad del camino. El método de solución propuesto en este segundo modelo es un algoritmo de optimización de colonia de hormigas.



### Análisis de resultados del estado del arte

En manera de resumen, en las figuras desde 5.1 hasta 5.5, se ilustra la distribución de los artículos de acuerdo a los criterios: (i) tipo de función objetivo, (ii) método de solución, (iii) tipo de modelo de programación usado, (iv) etapa de desastre natural estudiado, y finalmente (v) características de la función objetivo.



Figura 5.1: Distribución de la literatura en cuanto a tipo de función objetivo



Figura 5.2: Distribución de la literatura en cuanto a Método de solución

De acuerdo a los resultados encontrados en esta revisión literaria, se observa un sesgo relacionado a la investigación de problemas de tipo entero, resueltos por medio de heurísticas con funciones de un solo objetivo. Se puede notar igualmente, que en la investigación reciente se han encontrado más artículos enfocados al problema de respuesta, seguido por la preparación ante desastres naturales y en menor medida se



Figura 5.3: Distribución de la literatura en cuanto a tipo de problema



Figura 5.4: Distribución de la literatura en cuanto a etapa de desastre natural.

han encontrado modelos que combinan las etapas de preparación y de respuesta. En cuanto a la revisión de los modelos, con respecto a las funciones objetivo, la minimización de costos ha sido utilizada en mayor instancia por los investigadores y es seguida por otras funciones objetivos, las cuales incluyen factores más relacionados con los intereses de la logística humanitaria. Además, se puede evidenciar que dentro de las consideraciones de la configuración del problema, ningún artículo revisado ha considerado el caso en el que sea necesario el empaquetamiento y la producción de los kits de ayuda humanitaria conjuntamente con el apoyo entre diferentes actores públicos y privados para la preparación y respuesta a desastres naturales como se maneja en el modelo No.2. Por otro lado, en los artículos revisados no se considera el uso de un parámetro de urgencia o prioridades de una manera tan detallada como lo



Figura 5.5: Modelos de funciones objetivos .

maneja [Perez Rodriguez \(2011\)](#). Una de las características de [Perez Rodriguez \(2011\)](#) es que su modelo es no lineal y de gran complejidad, lo que dificulta la aplicación de casos en largas instancias. Otra diferencia entre [Perez Rodriguez \(2011\)](#) y el modelo No.1 de esta tesis es que, en [Perez Rodriguez \(2011\)](#) existe dinero suficiente para cumplir con la demanda, es decir no existe un capital que limite las acciones humanitarias, en cambio en los modelos de esta tesis se tiene una restricción que limita el costo total incurrido por medio de un capital. Si es requerido, el usuario del modelo podría realizar cambios en esta restricción con el fin de evaluar alternativas de solución considerando diferentes niveles de capital. Adicionalmente, otra importante contribución de esta tesis es que se proponen métodos de solución alternativos para resolver instancias de larga escala del problema. Además, como se mencionó anteriormente, el enfoque en el que se trabaja en esta tesis permite modelar situaciones en las cuales, debido a capacidades restrictivas no siempre es posible servir la demanda en un solo tiempo y se hace necesario planear estratégicamente hacia futuro en un ambiente dinámico. Las razones antes mencionadas permiten esperar que esta investigación represente una contribución a la literatura relacionada con la logística humanitaria.

---

## Capítulo 6

# Hipótesis y Diseño metodológico

### 6.1. Hipótesis

Es posible diseñar y solucionar un modelo matemático que pueda ser resuelto a través de diversos softwares de optimización y métodos heurísticos, y que permita a los encargados de prestar la ayuda a los afectados, tomar decisiones tácticas y operacionales en el momento de ocurrencia de un desastre natural, bajo las condiciones mencionadas anteriormente. Además estas decisiones permitirán responder de una forma eficaz el desastre natural con respecto a la minimización del sufrimiento humano, asociado a la gestión de una cadena logística humanitaria.

### 6.2. Diseño metodológico

El proceso metodológico de la tesis está compuesto por cuatro etapas.

- Etapa 1. Consiste en definir el área de estudio en la que se enfocará el trabajo de tesis. Se procederá a realizar una revisión exhaustiva del estado del arte en el problema de respuesta de un desastre natural, se buscará innovar en el enfoque de solución del problema, basándose en el estado del arte encontrado.
- Etapa 2. En esta etapa se pretende completar y validar el diseño de modelos matemáticos que consideren las condiciones del problema lo más cercano a la

realidad posible, y la descripción de los supuestos que se consideren. Los modelos se estudiarán a través de análisis de sensibilidad y de otros tipos de análisis para establecer sus propiedades analíticas y para conocer en profundidad su comportamiento bajo diferentes escenarios.

- Etapa 3. Establecer bajo qué condiciones existe la necesidad de usar métodos no exactos para solucionar el modelo planteado y diseñar una metodología de solución alternativa. Comprobar su destreza y experimentar con valores de los parámetros para obtener la mejor solución posible. Así mismo, se evaluará el comportamiento de nuestra metodología de solución en diferentes escenarios.
- Etapa 4. Aplicar la metodología propuesta a un caso de estudio.

---

# Capítulo 7

## Formulación de los modelos

Esta sección está organizada como sigue: primero se presenta la notación y la formulación matemática del modelo No.1, posteriormente se presentan las modificaciones y adiciones, referentes a la notación y la formulación matemática del modelo No.2.

### 7.1. Notación y Formulación matemática del modelo 1

#### 7.1.1. Notación del modelo No.1

A continuación se presenta la notación del modelo matemático No.1, el cual es pensado a ser aplicado en un ambiente estático y con el supuesto de inventario de palets disponibles una vez ocurra el desastre:

##### **Conjuntos**

$\mathbb{T}_0$ : Conjunto de tiempos, indexados a  $t$ .

**NOTA:** En este conjunto  $\mathbb{T}_0$ , se incluye un tiempo ficticio/artificial  $t = 0$ , que permitirá inicializar los valores de algunas variables. El tiempo en que se inician las actividades es  $t = 1$ .

$\mathbb{T}$ :  $\mathbb{T}_0/t = 0$ , i.e. Conjunto de tiempos excluyendo el periodo de tiempo inicial.

$\mathbb{PD}$ : Conjunto de puntos de demanda, considerando puntos aislados y no aislados, indexados a  $j$ .

$\mathbb{PT}$ : Conjunto de puntos de transferencia, indexados a  $c$ .

$\mathbb{CD}$ : Conjunto de centros de distribución, indexados a  $i$ .

$\mathbb{V}$ : Conjunto de vehículos regulares, indexados a  $v$ .

$\mathbb{B}$ : Conjunto de vehículos especiales, indexados a  $b$ .

$\mathbb{F}$ : Conjunto de palets, indexados a  $f$ .

### **Parámetros de demanda**

$\alpha_{jf}$ : Demanda de nodo  $j \in \mathbb{PD}$  de palet  $f \in \mathbb{F}$  al inicio del horizonte de planeación.

### **Parámetros de capacidad**

$\Gamma_{if}$ : Capacidad de inventario de palet  $f \in \mathbb{F}$  en nodo  $i \in \mathbb{CD}$  al inicio del horizonte de planeación.

$\kappa_{cf}$ : Capacidad de inventario de palet  $f \in \mathbb{F}$  en nodo  $c \in \mathbb{PT}$  al inicio del horizonte de planeación, 0 todos los casos.

$\eta_{iv}$ : Número de vehículos regulares  $v \in \mathbb{V}$  en nodo  $i \in \mathbb{CD}$ .

$\zeta_{cb}$ : Número de vehículos especiales  $b \in \mathbb{B}$  en nodo  $c \in \mathbb{PT}$ .

$\xi_{ij}$ : Tiempo de viaje ida y vuelta (horas) desde nodo  $i \in \mathbb{CD}$  hasta nodo  $j \in \mathbb{PD}$  en cada periodo de tiempo.

$\varepsilon_{ic}$ : Tiempo de viaje ida y vuelta (horas) desde nodo  $i \in \mathbb{CD}$  hasta nodo  $c \in \mathbb{PT}$  en cada periodo de tiempo.

$\varrho_{cj}$ : Tiempo de viaje ida y vuelta (horas) desde nodo  $c \in \mathbb{PT}$  hasta nodo  $j \in \mathbb{PD}$  en cada periodo de tiempo.

$\Omega_v$ : Capacidad de peso de vehículo  $v \in \mathbb{V}$ .

$\Phi_v$ : Capacidad de volumen de vehículo  $v \in \mathbb{V}$ .

$\Psi_b$ : Capacidad de peso de vehículo especial  $b \in \mathbb{B}$ .

$\Upsilon_b$ : Capacidad de volumen de vehículo especial  $b \in \mathbb{B}$ .

$W_t$ : Tiempo disponible (horas) en cada periodo de tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ , 0 en  $t=0$ .

### **Parámetros de palets**

$\rho_f$ : Volumen de palet  $f \in \mathbb{F}$ .

$\omega_f$ : Peso de palet  $f \in \mathbb{F}$ .

### **Parámetros de costos**

$A_{vij}$ : Costo de transporte de vehículo  $v \in \mathbb{V}$  desde nodo  $i \in \mathbb{CD}$  hasta nodo  $j \in \mathbb{PD}$ .

$C_{vic}$ : Costo de transporte de vehículo  $v \in \mathbb{V}$  desde nodo  $i \in \mathbb{CD}$  hasta nodo  $c \in \mathbb{PT}$ , incluyendo costo de transferencia.

$E_{bcj}$ : Costo de transporte de vehículo  $b \in \mathbb{B}$  desde nodo  $c \in \mathbb{PT}$  hasta nodo  $j \in \mathbb{PD}$ .

$G_f$ : Costo de adquisición de una palet  $f \in \mathbb{F}$ .

$M$ : Capital disponible para costos logísticos al inicio de horizonte de planeación.

### **Parámetros de prioridad**

$\varpi(j, t, f)$ : Medida de prioridad de nodo  $j \in \mathbb{DP}$  para palet  $f \in \mathbb{F}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

### **Variables de decisión**

$X_{vijt}$ : Número de viajes hechos por vehículo  $v \in \mathbb{V}$  desde nodo  $i \in \mathbb{DC}$  hacia nodo  $j \in \mathbb{PD}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$Q_{vijt}$ : Número de palets  $f \in \mathbb{F}$  enviadas en vehículo  $v \in \mathbb{V}$  desde nodo  $i \in \mathbb{CD}$  hacia nodo  $j \in \mathbb{PD}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$R_{vict}$ : Número de viajes hechos por vehículo  $v \in \mathbb{V}$  desde nodo  $i \in \mathbb{CD}$  hacia nodo  $c \in \mathbb{PT}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$U_{vfict}$ : Número de palets  $f \in \mathbb{F}$  enviadas en vehículo  $v \in \mathbb{V}$  desde nodo  $i \in \mathbb{CD}$  hacia nodo  $c \in \mathbb{PT}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$Z_{bcjt}$ : Número de viajes hechos por vehículo  $b \in \mathbb{B}$  desde nodo  $c \in \mathbb{PT}$  hacia nodo  $j \in \mathbb{PD}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$Y_{bfcjt}$ : Número de palets  $f \in \mathbb{F}$  enviadas en vehículo  $b \in \mathbb{B}$  desde nodo  $c \in \mathbb{PT}$  hacia nodo  $j \in \mathbb{PD}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$\theta_{fjt}$ : Demanda de palets  $f \in \mathbb{F}$  en nodo  $j \in \mathbb{PD}$  que resultan insatisfechas al final del tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$I_{fct}$ : Inventario de palets  $f \in \mathbb{F}$  en nodo  $c \in \mathbb{PT}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$\gamma_{fit}$ : Inventario de palets  $f \in \mathbb{F}$  en nodo  $i \in \mathbb{CD}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$N_t$ : Capital que resulta disponible al final del tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

## **7.1.2. Formulación matemática del modelo No.1**

En esta sección se presenta la formulación matemática del modelo matemático No.1, el cual considera inventario de palets disponibles una vez ocurra el desastre y además esta pensado para ser utilizado en un ambiente que se puede asumir estático.

### **Función objetivo modelo No.1**

Las condiciones de aplicación del modelo hacen necesario un objetivo humanitario, el cual se basa en el nivel de prioridad o urgencia de la demanda insatisfecha.



Específicamente, se usarán puntajes de prioridad con el fin de guiar al modelo a servir primero a las personas con mayor urgencia en los ítems básicos.

Este enfoque es soportado por el hecho de que en la logística humanitaria, conocer los valores de la demanda no es suficiente, sino que es también relevante relacionar esos valores de demanda a las necesidades individuales de la población afectada. La función que determina el puntaje de prioridad, (también llamado, función de prioridad) se representará con  $\varpi(\mathbb{PD}, \mathbb{F}, \mathbb{T})$ . Se asume que esta función de prioridad ha sido definida previamente por el usuario, i.e. es considerada como un parámetro de entrada del modelo. Sin embargo, se considera que dicha función debe tener en cuenta por lo menos los siguientes tres factores:

- El tiempo de espera, es decir el tiempo que cierto punto de demanda ha estado esperando la ayuda después de la ocurrencia del desastre.
- Las características sociales y topológicas del punto de demanda, las cuales corresponden a las condiciones en las que se encuentre un punto de demanda después de la ocurrencia del desastre. En el caso de la ubicación de ciertos puntos, es posible que el sentimiento de seguridad difiera entre un punto aislado o no aislado.
- Finalmente, la relevancia o la importancia de los productos contenidos en cada tipo de palet de acuerdo a las circunstancias en las que se encuentre el desastre.

La función objetivo considera la multiplicación de la función de prioridad definida por el usuario y la **tasa de servicio** en cada nodo  $j \in \mathbb{PD}$ , de palet  $f \in \mathbb{F}$ , en tiempo  $t \in \mathbb{T}$ . Por **tasa de servicio**, se quiere decir la porción de demanda que resulta insatisfecha (similar al concepto de **tasa de servicio** en logística comercial). A continuación, se formula formalmente la expresión matemática que representa la función objetivo:

**Función objetivo:**

$$Z_{min} = \sum_{\substack{j \in \mathbb{PD} \\ f \in \mathbb{F} \\ t \in \mathbb{T}}} \varpi(j, t, f) * \left( \frac{\theta_{fjt}}{\alpha_{jf}} \right) \quad (7.1)$$

En general, el principal objetivo de la Ec.(7.1) es minimizar la tasa total de la demanda insatisfecha (TDI) ponderado por su prioridad correspondiente. Igualmente, en este caso, la TDI puede ser vista como una medida de prioridad para un punto de demanda. Por ejemplo, si el TDI para un cierto  $PD$   $j$  es alto, significa que la demanda en  $j$  ha sido servida pobremente. En consecuencia, es probable que requiera más atención. Igualmente es razonable asumir que  $\varpi(j, t, f)$ , es una función no-decreciente con respecto a  $t$ , porque a medida que el tiempo pasa sin ser servido, el sufrimiento tiende a crecer.

### Restricciones del modelo 1

#### *Sujeta a:*

##### *1. Inicialización del capital*

$$N_0 = M \quad (7.2)$$

##### *2. Actualización del capital*

$$\begin{aligned}
 N_t = N_{t-1} - \sum_{\substack{v \in V \\ i \in CD \\ j \in PD}} A_{vij} * X_{vijt} - \sum_{\substack{v \in V \\ i \in CD \\ c \in PT}} C_{vic} * R_{vict} - \sum_{\substack{b \in B \\ c \in PT \\ j \in PD}} E_{bcj} * Z_{bcjt} \\
 - \sum_{\substack{v \in V \\ f \in F \\ i \in CD \\ c \in PT}} G_f * U_{vfict} - \sum_{\substack{v \in V \\ f \in F \\ i \in CD \\ j \in PD}} G_f * Q_{vfijt} \quad t \in T
 \end{aligned} \quad (7.3)$$

La Ec.(7.2), establece el capital disponible al inicio del horizonte de planeación. La Ec.(7.3) actualiza los valores de capital disponible en cada periodo de tiempo restando el costo logístico correspondiente del capital disponible al inicio del periodo. Este costo logístico está compuesto por dos costos: (i) costo de transporte, el cual depende del número de viajes, el tipo de vehículo y la ruta correspondiente; (ii) costo de adquisición, que depende del número de palets adquiridas.

## 3. Capacidad de peso en vehículos regulares

$$\sum_{f \in \mathbb{F}} Q_{vfijt} * \omega_f \leq \Omega_v * X_{vijt} \quad v \in \mathbb{V}, i \in \mathbb{CD}, j \in \mathbb{PD}, t \in \mathbb{T}_0 \quad (7.4)$$

$$\sum_{f \in \mathbb{F}} U_{vfict} * \omega_f \leq \Omega_v * R_{vict} \quad v \in \mathbb{V}, i \in \mathbb{CD}, c \in \mathbb{PT}, t \in \mathbb{T}_0 \quad (7.5)$$

## 4. Capacidad de volumen en vehículos regulares

$$\sum_{f \in \mathbb{F}} Q_{vfijt} * \rho_f \leq \Phi_v * X_{vijt} \quad v \in \mathbb{V}, i \in \mathbb{CD}, j \in \mathbb{PT}, t \in \mathbb{T}_0 \quad (7.6)$$

$$\sum_{f \in \mathbb{F}} U_{vfict} * \rho_f \leq \Phi_v * R_{vict} \quad v \in \mathbb{V}, i \in \mathbb{CD}, c \in \mathbb{PT}, t \in \mathbb{T}_0 \quad (7.7)$$

## 5. Capacidad de peso en vehículos especiales

$$\sum_{f \in \mathbb{F}} Y_{bfcjt} * \omega_f \leq \Psi_b * Z_{bcjt} \quad b \in \mathbb{B}, c \in \mathbb{PT}, j \in \mathbb{PD}, t \in \mathbb{T}_0 \quad (7.8)$$

## 6. Capacidad de volumen en vehículos especiales

$$\sum_{f \in \mathbb{F}} Y_{bfcjt} * \rho_f \leq \Upsilon_b * Z_{bcjt} \quad b \in \mathbb{B}, c \in \mathbb{PT}, j \in \mathbb{PD}, t \in \mathbb{T}_0 \quad (7.9)$$

Las ecuaciones que van desde Ec.(7.4) hasta Ec.(7.7) están relacionadas con los vehículos regulares. Entre ellas, Ec. (7.4) y (7.5), se refieren a la capacidad de peso, mientras que, Ec.(7.6) y Ec.(7.7) se refieren a capacidad en volumen. Por otro lado, las restricciones (7.8) y (7.9) se refieren a la capacidad de peso y volumen de vehículos especiales, (respectivamente). El objetivo de este conjunto de restricciones es garantizar que el peso total y el volumen que los palets ocupan en cada vehículo y en cada viaje, no excedan ni el peso, ni el volumen de los vehículos correspondiente

## 7. Limitación de número de viajes para vehículos regulares desde centros de distribución

$$\sum_{j \in \mathbb{PD}} X_{vijt} * \xi_{ij} + \sum_{c \in \mathbb{PT}} R_{vict} * \varepsilon_{ic} \leq W_t * \eta_{iv} \quad v \in \mathbb{V}, i \in \mathbb{CD}, t \in \mathbb{T}_0 \quad (7.10)$$

8. *Limitación de número de viajes para vehículos especiales desde puntos de transferencia*

$$\sum_{j \in \mathbb{PD}} Z_{bcjt} * \varrho_{cj} \leq W_t * \zeta_{cb} \quad b \in \mathbb{B}, c \in \mathbb{PT}, t \in \mathbb{T}_0 \quad (7.11)$$

Ec.(7.10) y Ec.(7.11) garantizan que el tiempo total relacionado a los viajes realizados por cierto vehículo en algún periodo de tiempo no exceda ni el tiempo disponible por el vehículo correspondiente, ni la longitud de cada periodo del horizonte de planeación, i.e. no hay unidades en tránsito al final de cada periodo de tiempo.

9. *Inicializar la capacidad de palets en centros de distribución*

$$\gamma_{fi0} = \Gamma_{if} \quad f \in \mathbb{F}, i \in \mathbb{CD} \quad (7.12)$$

10. *Actualizar la capacidad de palets en centros de distribución*

$$\gamma_{fit} = \gamma_{fit-1} - \sum_{\substack{j \in \mathbb{PD} \\ v \in \mathbb{V}}} Q_{vfijt} - \sum_{\substack{c \in \mathbb{PT} \\ v \in \mathbb{V}}} U_{vfict} \quad i \in \mathbb{CD}, f \in \mathbb{F}, t \in \mathbb{T} \quad (7.13)$$

En Ec.(7.12) se inicializa el inventario de palets en cada centro de distribución al inicio del horizonte de planeación, mientras que en Ec.(7.13) se actualiza el nivel de inventario de palets en cada centro de distribución, restando la cantidad de unidades enviadas desde cada centro de distribución, hacia un *DPs* o *TPs* del inventario inicial disponible ( $\gamma_{fit-1}$ ).

11. *Inicialización de valores de demanda y de inventario*

$$\theta_{fj0} = \alpha_{jf} \quad f \in \mathbb{F}, j \in \mathbb{PD} \quad (7.14)$$

$$I_{fc0} = \kappa_{cf} \quad f \in \mathbb{F}, c \in \mathbb{PT} \quad (7.15)$$

Ec.(7.14) inicializan los valores de demanda en cada nodo  $j \in \mathbb{PD}$ , mientras que Ec.(7.15) inicializa en cero el inventario de palets en cada *PTs*.

## 12. Actualización de demanda e inventario

$$\theta_{fjt} = \theta_{fjt-1} - \sum_{\substack{v \in \mathbb{V} \\ i \in \mathbb{CD}}} Q_{vfijs} - \sum_{\substack{b \in \mathbb{B} \\ c \in \mathbb{PT}}} Y_{bfcs} \quad f \in \mathbb{F}, t \in \mathbb{T}, j \in \mathbb{PD} \quad (7.16)$$

$$I_{fct} = I_{fct-1} + \sum_{\substack{v \in \mathbb{V} \\ i \in \mathbb{CD}}} U_{vfijs} - \sum_{\substack{b \in \mathbb{B} \\ j \in \mathbb{PD}}} Y_{bfcs} \quad f \in \mathbb{F}, t \in \mathbb{T}, c \in \mathbb{PT} \quad (7.17)$$

Ec.(7.16) actualiza los valores de la demanda insatisfecha de palets  $f \in \mathbb{F}$  al final del periodo de tiempo  $t \in \mathbb{T}$  en cada nodo  $j \in \mathbb{PD}$ . Note que la cantidad de demanda insatisfecha al final del periodo de tiempo  $t \in \mathbb{T}$  es solo la cantidad de demanda insatisfecha en el periodo de tiempo  $t - 1$  menos la cantidad de unidades enviadas a cada punto de demanda durante el periodo de tiempo  $t$ . Por otro lado, la Ec. (7.17) actualiza el nivel de inventario de palets  $f \in \mathbb{F}$  que están disponible en cada  $PT$  al final del periodo de tiempo  $t$ . Como antes, el inventario final en cada nodo  $c \in \mathbb{PT}$  es igual al inventario inicial menos la cantidad de unidades que se envían desde un  $PT$  más la cantidad de unidades que es recibido durante el periodo de tiempo  $t \in \mathbb{T}$ .

## 13. Naturaleza de las variables

$$N_t \geq 0 \quad (7.18)$$

$$I_{fct}, X_{vijt}, Q_{vfijs}, R_{vict}, U_{vfict}, Z_{bcjs}, Y_{bfcs}, \gamma_{fit}, \theta_{fjt} \in \mathbb{Z}^+ \quad (7.19)$$

Finalmente, ecuaciones 7.18 y 7.19 definen la naturaleza de las variables de decisión, donde  $\mathbb{Z}^+$  representa el conjunto de enteros positivos.

## 7.2. Notación y formulación matemática del modelo 2

Recuerde que el modelo No.2 es una extensión del modelo No.1, y tiene las siguientes características que los distinguen: (1) requiere tomar decisiones de empaque de kits y palets y (2) está diseñado para ser aplicado a un ambiente dinámico. Sin embargo toda la notación y la formulación matemática del modelo No.1 se conserva en el modelo No.2, pero existen unas modificaciones y adiciones que se enuncian a

continuación:

### 7.2.1. Notación del modelo No.2

Los cambios y adiciones en la notación del modelo No.2, son:

- Recuerde que en el modelo No.2 no se tiene en cuenta el supuesto de la disponibilidad de inventario de palets al inicio del desastre natural, sino que es necesario empaquetar y alistar los productos en kits y luego en palets. Por lo tanto, el parámetro  $\Gamma_{if}$  que determina el inventario disponible de palets en cada centro de distribución al inicio del horizonte de planeación pasa a tomar valores de cero en la primera iteración del algoritmo dinámico.
- Además, se adiciona la siguiente notación:

- **Conjuntos**

$\mathbb{D}$ : Indexado a  $hp = 1, 2, \dots$  da cuenta del orden del período de decisión actual, e.g. si  $hp = 2$  es porque ya se ejecutó un primer período de decisión y ahora estamos en el inicio de un segundo período de decisión (o iteración) del modelo dinámico.

$\mathbb{K}$ : Conjunto de kits, indexados a  $k$ .

$\mathbb{P}$ : Conjunto de productos, indexados a  $p$ .

- **Parámetros de demanda**

$\alpha_{jf}^{hp}$ : Demanda en nodo  $j \in \mathbb{PD}$  de palet  $f \in \mathbb{F}$  al inicio de iteración  $hp \in \mathbb{D}$ .

$\nabla_{jf}^{hp}$ : Aumento o disminución de demanda en  $j \in \mathbb{PD}$  de palet  $f \in \mathbb{F}$  en iteración  $hp \geq 1$ .

- **Parámetros de inventario**

$\Xi_{pi}^{hp}$ : Inventario de productos  $p \in \mathbb{P}$  en nodo  $i \in \mathbb{CD}$  al inicio de iteración  $hp \in \mathbb{D}$ .

$\beta_{ik}^{hp}$ : Inventario de kits  $k \in \mathbb{K}$  en nodo  $i \in \mathbb{CD}$  al inicio de iteración  $hp \in \mathbb{D}$ , 0 todos los casos (si  $hp = 1$ ).

$\Gamma_{if}^{hp}$ : Inventario de palet  $f \in \mathbb{F}$  en nodo  $i \in \mathbb{CD}$  al inicio de iteración  $hp \in \mathbb{D}$ , 0 todos los casos (si  $hp = 1$ ).

$\kappa_{cf}^{hp}$ : Inventario de palet  $f \in \mathbb{F}$  en nodo  $c \in \mathbb{TP}$  al inicio de iteración  $hp \in \mathbb{D}$ , 0 todos los casos (si  $hp = 1$ ).

- **Parámetros de recursos**

$\xi_i$ : Capacidad de trabajadores en  $i \in \mathbb{DC}$ .

- **Parámetros de productos**

$\Sigma_{kp}$ : Número de productos  $p \in \mathbb{P}$  en kit  $k \in \mathbb{K}$ .

$\varrho_{fk}$ : Número de kits  $f \in \mathbb{K}$  en palet  $f \in \mathbb{F}$ .

$\Upsilon$ : Número de kits que pueden empacar trabajadores en tiempo un periodo de tiempo.

$\lambda$ : Número de palets que pueden empacar trabajadores un periodo de tiempo.

- **Parámetros de costo:**

$O$ : Costo por contratar un equipo de trabajo.

- **Variables de decisión:**

$q_{kit}$ : Cantidad de kits  $k \in \mathbb{K}$  a empacar en  $i \in \mathbb{CD}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$p_{fit}$ : Cantidad de palets  $f \in \mathbb{F}$  a empacar en  $i \in \mathbb{CD}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$PI_{pit}$ : Inventario de productos  $p \in \mathbb{P}$  en  $i \in \mathbb{CD}$  al final del tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$KI_{kit}$ : Inventario de kits  $k \in \mathbb{K}$  en  $i \in \mathbb{CD}$  al final del tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ .

$H_{it}$ : Cantidad de Equipos de trabajo a contratar en  $i \in \mathbb{CD}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ , para armar kits.

$L_{it}$ : Cantidad de Equipos de trabajo a contratar en  $i \in \mathbb{CD}$  en tiempo  $t \in \mathbb{T}_0$ , para armar palets.

### 7.2.2. Formulación matemática del modelo No.2

La formulación matemática del modelo No.2 posee gran parte de las ecuaciones formuladas en el modelo No.1. Sin embargo, debido a las características distintivas mencionadas anteriormente se detallarán los cambios y las adiciones en la formulación matemática del modelo No.2, tanto para la función objetivo, como para las restricciones:

### Función objetivo modelo No.2

La función objetivo del modelo No.2, tiene el mismo fin o diseño que el utilizado en el modelo No.1. La diferencia radica en que para el modelo No.1, se conoce toda la demanda desde el inicio del desastre y en el modelo No.2, la demanda va estimándose en función de cada iteración  $hp \in D$  del algoritmo dinámico. Note que llamamos iteración a cada período de decisión del algoritmo dinámico. En otras palabras, antes de empezar cada iteración es necesario determinar la demanda total inicial actualizada, de la siguiente manera:

Siendo  $hp \in D$  el tiempo de inicio de las acciones de ayuda o la iteración del algoritmo dinámico. Se pueden presentar solo dos casos: (1) si  $hp=1$ ,  $\alpha_{jf}^{hp}$  es igual a la primera demanda estimada, así como  $\alpha_{jf}$  en el modelo No.1, y (2) si  $hp > 1$ , el valor de  $\alpha_{jf}^{hp}$  se obtiene usando la Ec.(7.20):

$$\alpha_{jf}^{hp} = \theta_{fj(hp-1)}^{hp-1} + \nabla_{fj}^{hp} \quad j \in \mathbb{DP}, f \in \mathbb{F} \quad (7.20)$$

La Ec.7.20 indica que la demanda total  $\alpha_{jf}^{hp}$  en la iteración  $hp \in D$  es igual al valor de la variable demanda ( $\theta_{fj(hp-1)}^{hp-1}$ ), obtenida en la iteración anterior ( $hp - 1 \in D$ ), más el aumento o disminución de la demanda en tiempo  $hp \in D$ , correspondiente a la información actualizada obtenida a partir de  $\nabla_{fj}^{hp}$ .

A continuación se muestran las modificaciones de las ecuaciones o in-ecuaciones del modelo No.1 y las adiciones de nuevas restricciones para la formulación matemática del modelo No.2:

#### **Función objetivo:**

$$Z_{min}(hp \mid hp \geq 1) = \sum_{\substack{j \in \mathbb{PD} \\ f \in \mathbb{F} \\ t \in \mathbb{T}}} \varpi(j, t, f) * \left( \frac{\theta_{fjt}^{hp}}{\alpha_{jf}^{hp}} \right) \quad (7.21)$$

Note que la función objetivo del modelo No.1, es igual a la función objetivo del modelo No.2 y tienen como principal objetivo minimizar la TDI ponderada por su



prioridad correspondiente. La diferencia entre una y otra radica en que el modelo No.2 trabaja en un enfoque dinámico, y se tienen tantas funciones objetivo como iteraciones  $hp \in D$  tiene el algoritmo dinámico. Una iteración se refiere a la repetición de la operación necesaria para obtener las variables de decisión y la función objetivo cada vez que se actualiza la información correspondiente al problema. En la función objetivo Ec.(7.21)  $hp$  representa que se está trabajando en un problema dinámico. Adicionalmente, note que  $\alpha_{jf}^{hp}$  es un parámetro de entrada, que representa la cantidad de demanda insatisfecha al inicio del horizonte de planeación para la iteración  $hp$  y se obtiene según se explicó anteriormente. Por otro lado, es importante que  $\alpha_{jf}^{hp}$  sea mayor que cero, para evitar problemas de indeterminación. Cada vez que  $\alpha_{jf}^{hp} = 0$ , significa que la demanda de palet  $f \in \mathbb{F}$  en nodo de demanda  $j \in \mathbb{PD}$  está totalmente satisfecha por las acciones tomadas en optimización resultante en la iteración  $hp - 1$ .

### Restricciones del modelo No.2

- Para el modelo No.2, se modifican las siguientes restricciones:

#### **Sujeta a:**

##### *2a. Actualización del capital (Modelo 2)*

$$\begin{aligned}
 N_t = N_{t-1} - \sum_{\substack{v \in \mathbb{V} \\ i \in \mathbb{CD} \\ j \in \mathbb{PD}}} A_{vij} * X_{vijt} - \sum_{\substack{v \in \mathbb{V} \\ i \in \mathbb{CD} \\ c \in \mathbb{PT}}} C_{vic} * R_{vict} - \sum_{\substack{b \in \mathbb{B} \\ c \in \mathbb{PT} \\ j \in \mathbb{PD}}} E_{bcj} * Z_{bcjt} \\
 - \sum_{\substack{v \in \mathbb{V} \\ f \in \mathbb{F} \\ i \in \mathbb{CD} \\ c \in \mathbb{PT}}} G_f * U_{vfict} - \sum_{\substack{v \in \mathbb{V} \\ f \in \mathbb{F} \\ i \in \mathbb{CD} \\ j \in \mathbb{PD}}} G_f * Q_{vfij t} - \sum_{i \in \mathbb{CD}} O * (H_{it} + L_{it}) \quad t \in \mathbb{T} \quad (7.22)
 \end{aligned}$$

La ecuación 7.22 del modelo No.2, es una modificación de la ecuación 7.3 del modelo No.1. En este caso se le agrega el costo asociado a contratar equipos de trabajo. Los costos logísticos en el modelo No.2 corresponderán a tres componentes: (i) costo de transporte; (ii) costo de adquisición y (iii) el costo de contratar equipos de trabajo.

- Se agregan las siguientes restricciones:

9. Iniciar los valores inventarios en centros de distribución de acuerdo a la iteración  $hp$

$$PI_{pi0} = \Xi_{pi}^{hp} \quad p \in \mathbb{P}, i \in \mathbb{CD} \quad (7.23)$$

$$KI_{ki0} = \beta_{ik}^{hp} \quad k \in \mathbb{K}, i \in \mathbb{CD} \quad (7.24)$$

$$\gamma_{fi0} = \Gamma_{if}^{hp} \quad f \in \mathbb{F}, i \in \mathbb{CD} \quad (7.25)$$

Las ecuaciones 7.23, 7.24 y 7.25, inician los valores de las capacidades de inventario de productos, kits y palets en cada centro de distribución en la iteración  $hp$ , respectivamente. A causa de la eliminación del supuesto de inventario de palets disponible, cada CD tiene un inventario de productos disponibles al inicio del horizonte de planeación, pero los inventarios de kits y los palets embalados y organizados en la iteración  $hp = 1$  son iguales a cero. Los valores iniciales de inventario de cada iteración se van actualizando de acuerdo a los resultados obtenidos en las variables de inventario respectivas en la iteración  $hp - 1$ . Por ejemplo,  $\Xi_{pi}^{hp} = PI_{pi}^{hp-1}$ .

10a. Actualizar la capacidad de inventarios en centros de distribución

$$PI_{pit} = PI_{pit-1} - \sum_{k \in \mathbb{K}} q_{kit} * \Sigma_{kp} \quad i \in \mathbb{CD}, p \in \mathbb{P}, t \in \mathbb{T} \quad (7.26)$$

$$KI_{kit} = KI_{kit-1} + q_{kit} - \sum_{f \in \mathbb{F}} p_{fit} * \varrho_{fk} \quad i \in \mathbb{CD}, k \in \mathbb{K}, t \in \mathbb{T} \quad (7.27)$$

$$\gamma_{fit} = \gamma_{fit-1} + p_{fit} - \sum_{\substack{j \in \mathbb{PD} \\ v \in \mathbb{V}}} Q_{vfijt} - \sum_{\substack{c \in \mathbb{PT} \\ v \in \mathbb{V}}} U_{vfict} \quad i \in \mathbb{CD}, f \in \mathbb{F}, t \in \mathbb{T} \quad (7.28)$$

Las Ec.(7.26), Ec.(7.27) y Ec.(7.28), actualizan los valores de inventario de productos, kits y palets respectivamente, en cada centro de distribución y cada periodo de tiempo. Hay que notar que la cantidad de inventario de cada producto, es simplemente el inventario en el periodo  $t-1$ , menos la cantidad de productos utilizados para armar kits. Para el inventario de kits, se mantiene el inventario de kits del tiempo anterior, sumando la cantidad de kits que se empaquen en el tiempo  $t$ , menos el número de kits utilizados para empacar los palets. Finalmente, el inventario de palets, depende de la cantidad de palets disponibles en el tiempo  $t-1$ , más la cantidad de palets que se produzcan en el tiempo  $t$ , y a este inventario se le resta la

cantidad de palets que se envían tanto a los puntos de demanda, como a los puntos de transferencia.

16. *Capacidad de elaboración de kits y palets:*

$$\sum_{k \in \mathbb{K}} q_{kit} \leq H_{it} * \Upsilon \quad i \in \mathbb{CD}, t \in \mathbb{T} \quad (7.29)$$

$$\sum_{f \in \mathbb{F}} p_{fit} \leq L_{it} * \lambda \quad i \in \mathbb{CD}, t \in \mathbb{T} \quad (7.30)$$

Las restricciones Ec.(7.29) y Ec.(7.30), impiden que la cantidad de kits y palets que se puedan realizar en cada unidad de tiempo exceda la capacidad que le permitan los equipos de trabajo.

17. *Capacidad de capital humano:*

$$L_{it} + H_{it} \leq \S_i \quad i \in \mathbb{CD}, t \in \mathbb{T} \quad (7.31)$$

La Ec.(7.31), garantiza que la cantidad de personas que se utilicen para las distintas actividades de empaquetar, tanto de kits como palets, no supere la capacidad de equipos de trabajo en cada centro de distribución, en cada tiempo.

13a. *Naturaleza de las variables*

$$q_{kit}, p_{fit}, PI_{pit}, KI_{kit}, H_{it}, L_{it} \in \mathbb{Z}^+ \quad (7.32)$$

Finalmente, se agrega la Ec.(7.32) donde se definen la naturaleza de las nuevas variables de decisión, donde  $\mathbb{Z}^+$  representa el conjunto de enteros positivos.

---

## Capítulo 8

### Caso de estudio

Para evaluar el desempeño de los modelos planteados se construyó un caso de estudio. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos después de implementar cada uno de los modelos propuestos bajo las condiciones de dicho caso de estudio, el cual está basado en la situación de inundación que se presentó en el Departamento del Atlántico, en Colombia a finales del año 2010. Específicamente, se discutirá la forma en que los modelos pudieron haber sido aplicados, así como los resultados que se hubiesen esperado. Además analizan los dos diferentes escenarios propuestos para cada modelo y así entender a profundidad las características operativas de los modelos, en especial, sus fortalezas y debilidades. Para este fin se presentará un análisis comparativo de los dos modelos.

#### 8.1. Descripción del caso de estudio

El Departamento del Atlántico, Colombia, está rodeado por agua: por el noroeste limita con el océano Atlántico; por el este, con el río Magdalena y; por el sur, por un dique llamado '*Canal del dique*'. Debido a estas características geográficas y a la topología del territorio, las inundaciones son el desastre más frecuente en época de lluvia en esta zona (desde <http://www.cridlac.org/digitalizacion/pdf/spa/doc19457/doc19457.htm#sthash.KJ1ihk8C.dpuf>). La peor situación de inundación ocurrió en Diciembre del 2010, cuando el dique de contención falló y gran parte del cono sur de este departamento resultó totalmente inundado, dejando como

consecuencias pérdidas económicas a las poblaciones afectadas, así como sufrimiento a las familias afectadas, debido al mínimo acceso que tenían a los productos y a los servicios requeridos para satisfacer sus necesidades básicas. La pertinencia de esta investigación está relacionada con la frecuencia de las inundaciones en este departamento en época de lluvias, especialmente pequeñas y medianas inundaciones, las cuales son las más comunes y generalmente no llaman la atención a las organizaciones de atención internacionales (Sodhi y Tang, 2013). En el contexto nacional, resulta pertinente, pues Colombia hace parte del listado de los países que más han sido afectados por las inundaciones, según Kellett y Sparks (2012). De hecho en el año en curso, ya se han emitido alertas respecto a fisuras en el Canal del Dique y aumentos de nivel del río cerca al municipio de Santa Lucia <http://www.elheraldo.co/local/en-santa-lucia-advierten-riesgo-en-tres-puntos-del-canal-del-dique-257704>.

## 8.2. Parámetros de entrada

Los datos de entrada para este caso de estudio se han conseguido por medio de entrevistas con personas afectadas por la inundación ocurrida en Diciembre de 2010 en Colombia, así como con parte del personal que se encargó de la ayuda humanitaria. También usó información procedente de reportes oficiales como los que se encuentran disponibles en el Registro Unico de Damnificados (RUD).

Debido a que el problema está planteado para ser trabajado usando un horizonte de planeación, en esta tesis se propone trabajar con un horizonte de planeación total de tres días. Sin embargo bajo el modelo No.2 existe la posibilidad de extender ese periodo si es necesario, debido a que este sigue un enfoque dinámico. En el modelo No.2, estos tres días o más del periodo de planeación, se dividirán en periodos reducidos de planeación (PRP) de 18 horas por cada iteración  $hp \in \mathbb{D}$  y se utilizarán ventanas de operación (VO) de 6 horas por cada  $t \in \mathbb{T}$  como lo representa la Figura 2.2. En resumen, hay tres VOs de 6 horas en cada PRP de 18 horas. El algoritmo dinámico finalizará hasta que la demanda total haya sido satisfecha o hasta que no existan más recursos para servir a la demanda.

El tiempo de la VO de seis horas se escogió por dos motivos principalmente: el primer motivo está dado por el supuesto de que nueva información es obtenida cada

seis horas, y esa nueva información permite cambiar las decisiones si es necesario. El segundo motivo, hace referencia a la función de prioridad que se escogió para aplicar en este caso de estudio. Esta función tiene la característica de ser continua y en este caso se pretende trabajarla de manera discreta. En consecuencia, entre menor sea el tiempo de las ventanas de operación, más cercano será el comportamiento de esta función discreta con la función continua original.

En cuanto a los recursos, en este caso se considerarán camiones como los vehículos regulares y botes como los vehículos especiales, debido a que se está considerando una situación de inundación. A su vez los camiones pueden ser de dos tipos, cada uno con sus propias restricciones de capacidad. Los puntos de demanda están definidos basados en las cinco poblaciones afectadas por la inundación: (i) Santa Lucía, (ii) Suan, (iii) Campo de la Cruz, (iv) Candelaria y (v) Manatí. La ubicación de estas poblaciones se pueden ver en la Figura 8.1. En esta figura también se puede observar la ubicación de la falla del dique. A continuación, se procederá a describir de forma general las características de las cinco poblaciones mencionadas anteriormente.

(i) **Santa Lucía** es la población localizada más cerca de la falla del dique. En 2010, esta población resultó completamente inundada. De hecho, el nivel del agua ascendió por encima de los techos de las casas. En el modelo, esta población es clasificada como un *PD* aislado (*PD5*), debido a que las carreteras que regularmente proveen el acceso a este lugar estuvieron totalmente inundadas. Con referencia a los valores de prioridad de esta población, se espera que tome valores relativamente altos en este nodo, debido a dos razones principales: (1) es la primera población en ser inundada, i.e. su tiempo de espera es mayor que las demás poblaciones, y (2) es un punto aislado, lo que implica que es improbable obtener un lugar seguro en la zona. (ii) **Suan** es el *PD4* en el modelo. La población afectada en esta población corresponde a personas que vivían en la zona rural. En Suan está localizado también un punto de transferencia (*PT1*). La razón por la cual se selecciona Suan como un *PT* es porque está ubicado a lado del río Magdalena y tiene un pequeño puerto lo que facilita el cargue de los botes. También, está cerca del punto aislado de Santa Lucía. Naturalmente Suan, no es un punto aislado a causa de la inundación, los camiones pueden venir directamente desde los centros de distribución. (iii) **Campo de la Cruz** es localizado en una tierra de bajo nivel y representa el punto de demanda 3

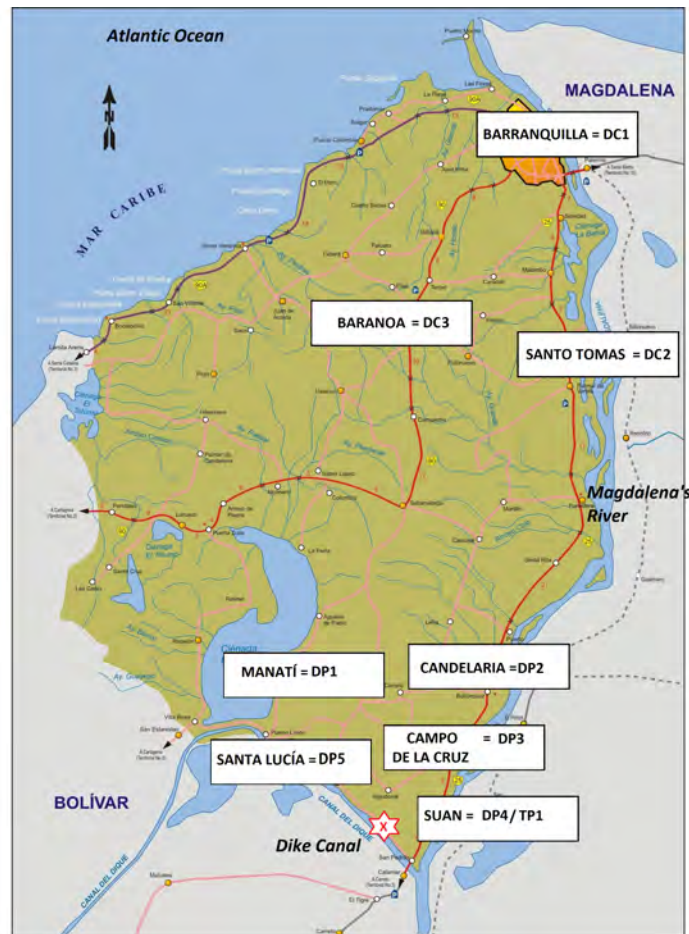


Figura 8.1: Mapa del Departamento del Atlántico: Tomado parcialmente de / modificado de :<http://www.zonu.com/America-del-Sur/Colombia/Atlantico/Carreteras.html>

(PD3). (iv) **Candelaria** y **Manatí** tiene áreas con mayor altitud y están cerca de las poblaciones mencionadas anteriormente. En este caso, la demanda proviene de la población que vive en la zona baja del área. Estas dos poblaciones representan los PD2 y PD1, respectivamente. Note que la inundación llega a estas poblaciones más tarde que en las otras poblaciones. Por esta razón, los valores de prioridad para Candelaria y Manatí deberían ser menores que los definidos para los otros puntos de demanda.

### 8.2.1. Parámetros de demanda

En esta sección se describe los tipos de bienes de ayuda considerados en este caso de estudio. Específicamente, se consideran dos tipos de kits: (i) un kit que contiene comida no perecedera (ii) otro kit compuesto por productos de cuidado personal. (Se dejan las comidas perecederas fuera del estudio debido a que por sus características particulares se necesitaría considerar ventanas de tiempo de entregas y fecha de vencimiento, lo cual no hace parte de los modelos y podría ser agregado como parte de futuras investigaciones) Basado en las entrevistas con organizaciones humanitarias, es razonable asumir que cada kit puede servir a una familia compuesta por 5-6 personas y puede durar un mes. En la Tabla B.1 de Anexo B se presentan los productos que son usados comúnmente para crear cada tipo de kit y sus costos (en Pesos Colombianos). Recordar que se asume que cada palet puede contener solo kits del mismo tipo. Por consiguientes, se tienen dos tipos de palets con diferentes características: (i) palet tipo 1 contiene diez kits de comida, mientras (ii) palet tipo 2 contiene diez kits de cuidado personal. Los pesos de los dos palets son de 181  $Kg$  y 50  $Kg$ , respectivamente, y las dos tienen 1  $m^3$  de volumen. Los valores de demanda de cada tipo de palet para cada  $PD$  está computado con base en los reportes del número de familias que fueron afectadas por la inundación en 2010. De acuerdo con los datos obtenidos en el RUD. Santa Lucía, Suan, Campo de la Cruz, Candelaria, y Manatí tenían 2359, 2016, 3637, 1854, y 3489 familias afectadas, respectivamente. La Tabla B.2 de Anexo B clasifica la demanda por tipos de palets.

### 8.2.2. Parámetro valores de prioridad

Es necesario clarificar que los valores de prioridad usados en este caso de estudio son usados solo con fines ilustrativos, debido a que el principal objetivo no es el desarrollo de una función de prioridad. Por lo tanto se insiste en el hecho de que el usuario debería definir su propia función de prioridad antes de utilizar los modelos propuestos, pero como se ha mencionado con anterioridad, considerar que debería tener en cuenta al menos los siguientes aspectos: (i) tiempo de espera, (ii) tipo de producto de ayuda y (iii) las características sociales particulares de cada  $PD$ . En la literatura existe un estudio conocido como costos de privación o *deprivation cost*



*function* y se enuncian en Holguín-Veras et al. (2013) y en Perez Rodriguez (2011). De acuerdo al problema que se está trabajando, las características de esta función se pueden considerar como adecuadas para la implementación en los modelo como la función de prioridad. En esta tesis, se trabajará de manera ilustrativa los valores de la función de prioridad que serán parte de las pruebas del modelo, usando la función de los costos de privación. Sin embargo, la principal limitación que se tiene con la función de privación enunciada por Holguín-Veras et al. (2013) y Perez Rodriguez (2011), es que esta es una función continua, mientras que los modelos que se manejan en esta tesis trabajan con ventanas de tiempo con valores discretos en cuanto al tiempo. En búsqueda de adaptar, la función de privación a los modelos en cuestión, se decidió transformar la función dada por (Holguín-Veras et al., 2013) en una función discreta, donde pueda tomar valores desde 0 al infinito.

### Costos de privación

En modo de ejemplo se enuncia una función de costos de privación obtenida de (Holguín-Veras et al., 2013):

$$\gamma_g(\delta_{it}) = e^{1,5031-0,1172*\delta_{it}} - e^{1,5031} \quad (8.1)$$

En la ecuación 8.1,  $\gamma_g$  representa una función de costo de privación genérica y  $\delta_{it}$  representa el tiempo de privación en el nodo  $i$  al tiempo  $t$ . La ecuación 8.1 representa la cantidad de dinero que se estaría dispuesto a pagar por agua en un cierto punto de demanda, dependiendo del tiempo sin agua. En la disertación doctoral de Perez Rodriguez (2011), se utilizaron dos ecuaciones para representar dos productos de ayuda, uno de alta prioridad como en Ec.8.2 y otra para productos de baja prioridad, como en Ec.8.3.

$$\gamma_H(\delta) = e^{(1,5031-0,1172*\delta)} - e^{1,5031} \quad (8.2)$$

$$\gamma_L(\delta) = e^{(0,065*\delta)} - 1 \quad (8.3)$$

Tanto la ecuación 8.2, como la ecuación 8.3, se podrían usar en los modelos, si se asume que el costo de privación se hace efectivo al final del periodo de tiempo de la ventana de operación VO, solo si el punto de demanda no ha sido servido. Es decir que si el total de la demanda de cierto PD, se sirve en cualquier punto del

tiempo entre las 6 horas de una ventana de operación, significa que no existe ninguna privación al final de esta ventana, si es una entrega parcial o nada se penalizará al final de la ventana de operación.

Este supuesto para aproximar de una manera discreta las funciones dadas por Holguín-Veras et al. (2013) y Perez Rodriguez (2011), permitirá trabajar un modelo lineal con mayor capacidad de solución a problemas con grandes instancias.

### 8.2.3. Cadena de suministro para la distribución y parámetros de capacidad

Para el caso de estudio, se usa un *CDP* y dos *CD*. Esos puntos de distribución corresponden a almacenes que actualmente pertenecen a la compañía privada comercializadora de alimentos más popular en la región. Se considera el supuesto de un acuerdo previo con esta compañía. De acuerdo a entrevistas realizadas con gerentes de la misma, es razonable asumir que podrían garantizar ciertos recursos: (i) centros de distribución o bodegas con capacidad suficiente para suplir completamente la demanda, (ii) un número limitado de vehículos y (iii) acceso de mano de obra para realizar las labores de empaque (modelo No.2). En este hecho, se usan sus centros de distribución como los nodos de la cadena de suministro. La ubicación de estos centros de distribución son mostrados en la Figura 8.1. Los *CDs* están localizados en tres diferentes ciudades, la máxima capacidad de inventario, y el número de tipos de vehículos disponibles en cada *CD* es como sigue: (i) Barranquilla (la cual es la capital del Departamento del Atlántico) es el (*CD1*), y es también *CDP* con capacidad infinita de cada palet, pero con 70 vehículos resultantes disponibles, 40 tipo 1 y 30 tipo 2, además tiene disponibilidad de 70 personas en la mano de obra, (ii) Santo Tomas es el (*CD2*), el máximo número de palets es 20, dividido entre tipo 1 y 2, y (iii) Baranoa es el (*CD3*) tiene las mismas características de Santo Tomas. Santo Tomas y Baranoa solo tiene disponibilidad de 10 personas en la mano de obra, y de diez vehículos tipo 1 y diez tipo 2. Las restricción de capacidad de cada vehículo tipo 1 y tipo 2, en volumen son  $18\ m^3$  y  $12\ m^3$ , y las capacidades de peso son  $4500\ Kg$  y  $3500\ Kg$ , respectivamente. Por otro lado en el caso de estudio, los botes (vehículos especiales) están comúnmente localizados en el puerto de Suan (PT1). La capacidad en este puerto es de 15 botes, con  $10\ m^3$  de capacidad de volumen y 500

*Kg* capacidad de peso.

#### 8.2.4. Parámetros de costos

Para calcular los costos de distribución se tomó en consideración los valores establecidos en el ministerio de transporte de Colombia, según la caracterización del transporte (disponible desde <https://www.mintransporte.gov.co/documentos.php?id=15>). Estos costos dependen del tipo de vehículo y la distancia entre punto y punto. En la tabla B.3 del apéndice B, se muestran los costos de transporte en Pesos Colombianos desde los centros de distribución a los puntos de demanda no aislados, al igual que los costos de transporte desde puntos de transferencia a nodos de demanda aislado. Estos costos incluyen el costo de transferencia considerado por cada viaje. Por otro lado la tabla B.1 contiene los costos de adquisición de cada tipo de palet.

### 8.3. Proceso de decisión de los modelos

En esta sección se explicarán los resultados que se obtienen al poner a prueba los modelos con los datos relacionados al caso de estudio. Hay que destacar que el modelo No.1 trabaja en un enfoque estático y toma las decisiones solamente en una ocasión, mientras que el modelo No.2 utiliza un algoritmo dinámico, basado en un enfoque de 'rolling horizon'. El Algoritmo 1 y la Figura 2.2, ilustran el comportamiento esperado

del algoritmo dinámico.

Definir  $t = 0$ ;

**mientras** *¿ existen recursos y la demanda no está satisfecha?* **hacer**

**si**  $t = 0$  **entonces**

        Resolver;

        La solución del problema considera las decisiones realizadas desde el tiempo  $t' = 0$  hasta el  $t' = t' + 4$ ;

**en otro caso**

**si** *¿Hay cambios en parámetros?* **entonces**

            Resolver el problema considerando los nuevos valores de los parámetros;

            La solución del problema considera el proceso de decisión desde el tiempo  $t' = t$ , hasta el  $t' = t' + 4$ ;

**en otro caso**

            Resolver el problema desde el tiempo  $t' = t$ , hasta el  $t' = t' + 4$  ;

**fin**

**fin**

$t = t + 1$ ;

**fin**

**Algoritmo 1:** Descripción general del algoritmo dinámico

En búsqueda de realizar una comparación entre el comportamiento de los dos modelos, se usará una VO de seis horas, tanto para el modelo No.1, como en el modelo No.2. Los resultados se muestran a continuación.

### 8.3.1. Resultados del caso de estudio usando modelo No.1

En la tablas 8.1 y 8.2, se muestran las soluciones que se han obtenido después de poner a prueba el modelo No.1, con los datos del caso de estudio. La Tabla 8.1 muestra el número de viajes desde cada  $CD$  a cada  $PD$  o  $PT$  y la cantidad de unidades correspondientes usando vehículos regulares, cada tiempo. La Tabla 8.2 presenta el número de viajes desde cada  $PT$  a cada  $PD$  aislado y la cantidad de unidades correspondientes en cada tiempo, usando vehículos especiales.

Basados en la solución presentada en las tablas 8.1 y 8.2, la tasa de demanda

Programación	Número de viajes						Cantidad de productos					
	Vehículo 1			Vehículo 2			Palet 1			Palet 2		
Ruta — Tiempo	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
$CD1 \rightarrow PD1$	0	17	16	0	9	0	0	50	281	0	364	0
$CD1 \rightarrow PD2$	9	2	1	3	10	0	12	156	1	186	0	0
$CD1 \rightarrow PD3$	7	18	0	0	18	1	0	317	1	126	223	0
$CD1 \rightarrow PD4$	4	0	0	24	0	1	170	0	2	190	0	0
$CD2 \rightarrow PD1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD2 \rightarrow PD2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD2 \rightarrow PD3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD2 \rightarrow PD4$	0	0	0	2	0	0	10	0	0	10	0	0
$CD3 \rightarrow PD1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PD2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PD3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PD4$	1	0	0	0	0	0	10	0	0	10	0	0
$CD1 \rightarrow PT1$	21	0	0	6	0	0	215	0	0	235	0	0
$CD2 \rightarrow PT1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PT1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 8.1: Plan de distribución concernientes a vehículos regulares

puede ser computada usando la expresión:  $R^{PD} = 100\% - ((\frac{\sum_{v,i} Q_{vfijt}}{\alpha_{jf}})) * 100\%$ ,  $j \in \mathbb{PD}$ ,  $f \in \mathbb{F}$  y  $t \in \mathbb{T}_{\mathbb{O}}$ .

#### ■ Periodo de Tiempo 1

Note que la programación en el periodo de tiempo 1 los nodos de demanda servidos son  $PD5$ ,  $PD4$ ,  $PD3$  y  $PD2$ , pero de acuerdo a la urgencia se tomó la decisión de la siguiente manera:

- Se sirvió el 100 % del total de la demanda de palets 1 y 2 en  $PD5$ . También

Programación	Número de viajes			Cantidad de productos					
	Bote 1			Palet 1			Palet 2		
Ruta — Tiempo	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
$PT1 \rightarrow PD5$	90	0	0	215	0	0	235	0	0

Cuadro 8.2: Plan de distribución concernientes a vehículos especiales

sirvió, 100 % del total de la demanda de palets 2 en  $PD4$  y  $PD2$ .

- Sirvió el 99 % de la demanda de palets 1 en  $PD4$ . También se sirvió el 36,1 % de la demanda de palets 2 en  $PD3$ , y el 7,1 % de la demanda de palets 1 en  $PD3$ .

#### ■ Periodo de tiempo 2 y periodo de tiempo 3

En el periodo de tiempo 2 la demanda total de palet tipo 2 fue servida, pero el porcentaje de servicio de las palet tipo 1 está alrededor de 99 % en  $PD2$ ,  $PD3$  y  $PD4$ , y solo de 15 % en  $PD1$ . En el periodo de tiempo 3 se sirvió toda la demanda.

El análisis y la comparación de los resultados en los dos modelos se presentará en la sección 8.3.3.

### 8.3.2. Resultados del caso de estudio usando modelo No.2

En las tablas 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 8.7, 8.8, y 8.9 se muestran las soluciones que se han obtenido del caso de estudio, pero en este caso usando el modelo No.2.

Programación	Empaques de kits									
	Kit 1					Kit 2—				
Tiempo	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
$CD1$	110	3790	2260	5335	0	5690	2110	3540	100	0
$CD2$	990	10	0	0	0	610	390	0	0	0
$CD3$	990	10	0	0	0	610	390	0	0	0

Cuadro 8.3: Plan empaques concernientes a kits

Las Tabla 8.3 muestra la programación de la producción y empaque de los kits, mientras que la Tabla 8.4 hace los mismo pero con los palets. Adicionalmente en la Tabla 8.5 se muestra la programación de la contratación de personal para realizar los empaques tanto de kits, como de palets. En la Tabla 8.6 se muestra el número de viajes desde cada centro de distribución a cada  $PD$  o  $PT$  y en la Tabla 8.7, se muestra la cantidad de unidades correspondientes usando vehículos regulares, cada tiempo. Por último la Tabla 8.8 presenta el número de viajes desde cada  $PT$  a cada  $PD$

	Empaques de pallets									
Programación	Pallet 1					Pallet 2				
Tiempo	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
<i>CD1</i>	10	339	211	485	0	569	211	354	10	0
<i>CD2</i>	90	0	0	0	0	61	39	0	0	0
<i>CD3</i>	90	0	0	0	0	61	39	0	0	0

Cuadro 8.4: Plan empaques concernientes a palets

	Personal a contratar									
Programación	Kits					Palets				
Tiempo	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
<i>CD1</i>	58	59	58	55	0	12	11	12	15	0
<i>CD2</i>	16	4	0	0	0	4	1	0	0	0
<i>CD3</i>	16	4	0	0	0	4	1	0	0	0

Cuadro 8.5: Plan de empaques concernientes al personal de para empaque de palets y kits

aislado y la Tabla 8.9 cantidad de unidades correspondientes en cada tiempo, usando vehículos especiales. Es necesario resaltar que bajo las condiciones del caso de estudio, en cuanto a demanda y capacidades similares a las trabajadas en el modelo No.1, no se consiguió suplir completamente la demanda en las tres ventanas de operación de 6 horas propuestas, sino que fue necesario usar 5 ventanas de operación. La solución que se presenta usando algoritmo dinámico requirió de tres iteraciones, para cumplir con el objetivo, las cuales se describen a continuación: (i) en la primera iteración, el algoritmo dinámico resolvió el problema desde el tiempo  $t = 0$  a  $t = 3$ , como la demanda no fue completamente satisfecha en la iteración  $hp = 1$ , y quedó disponible suficientes recursos en cuanto a inventarios entre otros, sigue a una segunda iteración. (ii) Para la segunda iteración,  $hp = 2$ , el algoritmo dinámico resuelve el problema desde el tiempo  $t = 1$  a  $t = 4$ , usando los parámetros actualizados (demanda, inventarios) en tiempo  $t = 1$  de la iteración  $hp = 1$ . Igualmente en la iteración  $hp = 2$  la demanda no se satisface, pero sigue teniendo suficientes recursos. Finalmente, (iii) en la iteración tres  $hp = 3$  el algoritmo dinámico resuelve el problema de nuevo desde el  $t = 2$  a  $t = 5$ . En esta ocasión, es esperado satisfacer la demanda. En una

Programación Ruta — Tiempo	Número de viajes									
	Vehículo 1					Vehículo 2				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
$CD1 \rightarrow PD1$	0	0	21	15	0	0	0	0	2	5
$CD1 \rightarrow PD2$	11	7	0	0	0	0	0	4	0	0
$CD1 \rightarrow PD3$	0	0	0	0	0	5	18	27	14	0
$CD1 \rightarrow PD4$	0	1	0	0	0	14	0	0	0	0
$CD2 \rightarrow PD1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD2 \rightarrow PD2$	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD2 \rightarrow PD3$	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0
$CD2 \rightarrow PD4$	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PD1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PD2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PD3$	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PD4$	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0
$CD1 \rightarrow PT1$	14	12	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD2 \rightarrow PT1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PT1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 8.6: Plan de viajes concernientes a vehículos regulares en modelo 2

situación realista el algoritmo debería mantenerse trabajando hasta que no exista nueva información. Si se analizan las tablas 8.3, 8.4 y 8.5, se encuentra que se trabaja al 100 % de la capacidad de contratación hasta el tiempo  $t = 4$ , donde finalmente se alcanza a empacar el ultimo palet para suplir la demanda. Por otro lado, al analizar el modelo 2 de igual manera que el modelo 1, de acuerdo con la solución presentada en las tablas 8.6, 8.7, 8.8, y 8.9 se tiene lo siguiente:

#### ■ Periodo de Tiempo 1

Note que la programación en el periodo de tiempo 1 los nodos de demanda servidos son  $PD5$ ,  $PD4$ ,  $PD3$  y  $PD2$ , pero de acuerdo a la urgencia tomó la decisión de la siguiente manera:

- Se sirvió el 100 % del total de la demanda de palets 2 en  $PD5$ , igualmente en  $PD4$  y  $PD2$ , pero solo sirvió el 17 % en  $PD3$ .
- Sirvió el 99 % de la demanda de palets 1 en  $PD4$ .



Programación	Número de unidades									
	Palet 1					Palet 2				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
$CD1 \rightarrow PD1$	0	0	0	276	55	0	0	354	10	0
$CD1 \rightarrow PD2$	0	122	47	0	0	125	0	0	0	0
$CD1 \rightarrow PD3$	0	0	164	154	0	60	211	0	0	0
$CD1 \rightarrow PD4$	10	2	0	0	0	149	0	0	0	0
$CD2 \rightarrow PD1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD2 \rightarrow PD2$	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0
$CD2 \rightarrow PD3$	0	0	0	0	0	0	39	0	0	0
$CD2 \rightarrow PD4$	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PD1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PD2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PD3$	0	0	0	0	0	0	39	0	0	0
$CD3 \rightarrow PD4$	90	0	0	0	0	61	0	0	0	0
$CD1 \rightarrow PT1$	0	215	0	0	0	235	0	0	0	0
$CD2 \rightarrow PT1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CD3 \rightarrow PT1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 8.7: Plan de distribución de unidades concernientes a vehículos regulares en modelo 2

### ■ Periodo de tiempo 2

En el periodo de tiempo 2 la demanda total de palets tipo 2 fue servida en todos los puntos de demanda, excepto en el  $PD1$ , donde la tasa de servicio fue del 0%. En cuanto a la demanda de palet tipo 1 se alcanzó a servir el 100% del total de la demanda en  $PD5$ , mientras que la capacidad alcanzó a suplir solamente 72% de la demanda en  $PD2$ .

### ■ Periodo de tiempo 3

Programación	Número de viajes				
	Bote 1				
	T1	T2	T3	T4	T5
$PT1 \rightarrow PD5$	24	78	0	0	0

Cuadro 8.8: Plan de distribución concernientes viajes desde vehículos especiales

Programación	Cantidad de productos									
	Palet 1					Palet 2				
Ruta — Tiempo	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
$PT1 \rightarrow PD5$	0	215	0	0	0	235	0	0	0	0

Cuadro 8.9: Plan de distribución concernientes unidades en vehículos especiales

En el periodo de tiempo 3 la demanda total de palet tipo 2 en el  $PD1$ , se sirvió en 97 %. En cuanto a la demanda de palet 1 se sirvió el 100 % del total de la demanda en  $PD2$ , y el 52 % de la demanda en  $PD3$ .

#### ■ Periodo de tiempo 4

En el periodo de tiempo 4 se terminó de suplir la demanda total de palets 2 en el  $PD1$ , además de la demanda de palets 2 en  $PD3$ . Por otro lado se alcanzó a suplir el 83 % de la demanda de palets 1 en  $PD1$ .

#### ■ Periodo de tiempo 5

En este periodo de tiempo no se tiene demanda insatisfecha en ningún punto de demanda.

### 8.3.3. Análisis resultados de caso de estudio en modelo No.1 y en modelo No.2

Al observar los resultados obtenidos en cada uno de los modelos se pueden obtener varias conclusiones con respecto al funcionamiento de los modelos:

- El horizonte de planeación de las actividades y el tiempo de finalización de la respuesta, depende totalmente de las capacidades del sistema logístico. Entre un modelo y otro, hay ciertas características restrictivas que los diferencia. Por ejemplo, en escenarios con abundancia de recursos consumibles como Capital e Inventario. El parámetros que determinarán el tiempo de respuesta para el modelo No.1 es la cantidad de vehículos, pues de este depende la capacidad de distribución. Por otro lado, la cantidad de mano de obra disponible, determinará el modelo No.2 la capacidad de empaque. Es evidente establecer que bajo

las mismas condiciones de demanda, es muy probable que el modelo No.2 demore más tiempo que el modelo No.1 para servir completamente la demanda, debido a que es necesario empacar los bienes de ayuda antes de enviarlos. Esto no significa que el modelo No.1 es mejor que el modelo No.2, pero si demuestra de forma clara que la falta de preparación, ocasionará tiempos adicionales que aumentará el sufrimiento de las personas.

- Con respecto al comportamiento de la función de prioridad, se observa su gran relevancia en el proceso de toma de decisiones debido a que se evidencia que existe un mayor porcentaje de envío a los puntos de demanda con mayores prioridades. Sin embargo, no siempre la mejor decisión es escoger servir aquellos puntos con una mayor importancia relativa. Por ejemplo, en algunas ocasiones es mejor servir a nodos con un valor de prioridad relativamente bajos en tiempo  $t$  para evitar peores consecuencias por esperar hasta el tiempo  $t+1$ , pero se evidencia con mucho más detalle en los casos en los que no hay suficiente capacidades.

Después de haber probado los dos modelos con el caso de estudio, haber analizado e identificado las características y funcionamiento de las variables de decisión, se realizará el análisis de los modelos bajo circunstancias aleatorias y se buscara conocer el comportamiento que pueden tener ante posibles variaciones en sus parámetros de entrada.

---

## Capítulo 9

# Experiencia computacional

En este capítulo se presentarán los resultados correspondientes a la experiencia computacional de los modelos planteados. En este sentido se probará la capacidad de solución de los modelos propuestos y se realizará un análisis de sensibilidad para cada modelo y de esta manera se determinarán los parámetros que afectan tanto la función objetivo, así como el tiempo de solución.

### 9.1. Generación de problemas

Los valores que se usarán en esta sección serán generados con fines ilustrativos solamente, sin embargo se diseñaron de tal manera que puedan ser consideradas como realistas. En este sentido se considerará un área afectada de la situación de desastre como un rectángulo en el plano cartesiano con tamaño de 500 en el *eje-x* y de 100 en el *eje-y*. Una instancia del problema la definen el número de centros de distribución, puntos de demanda y puntos de transferencia, así como el número de palets, el número de productos y kits, para el modelo 2. En ese sentido, los PDs, PTs y CDs, se distribuyen aleatoriamente en el *eje-x* entre valores de 0 hasta 500, mientras que los valores del *eje-y* de estos nodos puede tomar valores entre 0 y 100. Por otro lado el CDP estará ubicado, fuera de la zona del área afectada en la coordenada *y* de 200, mientras que la coordenada *x*, toma el valor de 250. (Ver Figura 9.1)

Los valores de demanda y las capacidades de los centros de distribución usados en este análisis, están distribuidos aleatoriamente de acuerdo a los valores de las

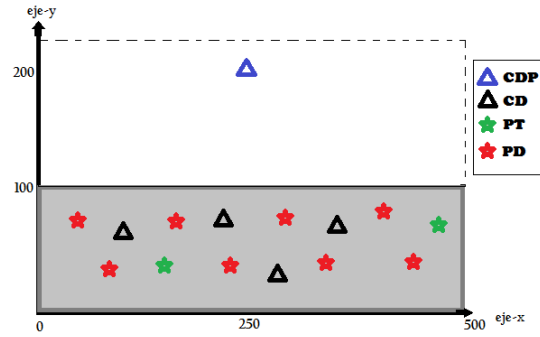


Figura 9.1: Descripción generación de problema

poblaciones distribuidas en el área afectada por el desastre. Se establecieron valores entre 10 y 5000 familias por punto de demanda. Los costos de adquisición de los palets, así como las características de capacidad de los vehículos regulares, especiales y los palets se mantendrá igual que como se explicó en el caso de estudio 8. Los valores de las funciones de prioridad igualmente, son generados de manera aleatoria teniendo en cuenta las ecuaciones 8.2 y 8.3.

## 9.2. Resultados obtenidos

En esta sección se analizan las capacidades de solución de los modelos usando un computador portátil DELL Inspiron 14z, con Intel(R) Core(TM) i5-3317U CPU @ 1.70GHz procesador, 8GB de RAM instalados y 7.87 GB usables, con sistema operativo de 64 bits, con procesador x64 y Windows 8.1 Pro, además se usó el paquete IBM ILOG CPLEX 12.6.0, por medio del lenguaje de programación *java*.

### Capacidad de solución del modelo No.1

En el modelo No.1 la última columna de la Tabla 9.1 muestra los tiempos de solución para cada problema que se probó. En este caso, se han creado escenarios con un total de 1125, 112500, 292500 y 1350000, variables de decisión respectivamente. La Tabla 9.1 muestra el número de nodos de cada tipo ( $DP$ ,  $TP$ , y  $DC$ ), así como el número de nodos para cada variable de decisión ( $X$ ,  $Q$ ,  $R$ ,  $U$ ,  $Z$  y  $Y$ ). Este modelo fue evaluado usando una instancia para cada escenario. En este caso al ser el modelo

estático, solamente se resuelve el problema desde el periodo de tiempo  $t = 0$ .

Nodos				Tamaño de Variable						Modelo
T	DP	TP	DC	X	Q	R	U	Z	Y	CPU(s)
3	10	5	5	150	300	150	300	75	150	1,76
3	100	50	50	15000	30000	15000	30000	7500	15000	285
3	200	100	50	60000	12000	30000	60000	7500	15000	676
4	300	150	150	180000	360000	180000	360000	90000	180000	$\gg 14000$

Cuadro 9.1: Reporte numérico de diferentes casos de larga escala

En este ejemplo sencillo se puede observar que el tiempo de solución crece a medida que el número de nodos incrementa. En este caso, para el último escenario, el tiempo de solución óptima fue considerablemente largo (aproximadamente 4 horas). Note que para problemas relativamente pequeños, los tiempos de solución no son un problema, y estos pequeños problemas son muy comunes. Un ejemplo es el caso de estudio discutido en esta tesis está basado en un problema real con solo cinco nodos de demanda, tres nodos de centros de distribución y un punto de transferencia. Entonces, se puede concluir que este modelo puede ser fácilmente implementado en desastres de pequeña escala o situaciones de emergencia. Sin embargo se requiere una metodología de solución más eficiente para su implementación en desastres de larga escala.

## Capacidad de solución del modelo No.2

De acuerdo con los resultados encontrados en el modelo No.1, se plantea como hipótesis que el comportamiento en el modelo No.2 será parecido al obtenido en el modelo No.1, con base en que existen muchas características comunes entre este par de modelos. En este sentido para analizar el modelo No.2, se realizó la prueba de diez réplicas por cada escenario de número de nodos, donde se computan el tiempo promedio y el tiempo máximo que se obtiene en cada muestra, como se observa en la Tabla 9.2. Los datos de la Tabla 9.2 se obtuvieron usando pruebas aleatorias fijando en dos el número de palets y kits. Además se fijó como 20 el número de productos. Por otro lado, se trabajó solamente con dos tipos de vehículos regulares y un solo tipo de vehículo especial. En cuanto al tiempo, se decidió tomar el resultado factible

con un límite de tiempo de 1800 segundos.

Nodos				Tiempo		Función
T	DP	TP	DC	Tiempo prom.(s)	Tiempo máx.(s)	Objetivo
4	30	10	40	25	39	1748,03
4	30	20	80	39	60	3709,47
4	30	30	120	50	86	5752,12
4	30	60	240	106	162	12154,52
4	50	10	40	41	63	1700,72
4	50	20	80	73	102	3647,24
4	50	30	120	125	218	5646,71
4	50	60	240	320	389	11722,17
4	100	10	40	142	251	1408,09
4	100	20	80	362	986	3242,66
4	100	100	300	1648,25	1881,29	15176,47
4	200	50	150	1834,01	1937,02	7211,35
4	200	100	300	NA	NA	NA

Cuadro 9.2: Reporte numérico de diferentes casos de larga escala modelo No.2

Al realizar un análisis de los datos utilizados para la creación de la Tabla 9.2, usando Análisis de Varianza (ver en Anexo C), se tiene evidencia estadística de que tanto el tiempo de solución, como la función objetivo, están influenciados tanto por el número de CD, como de PDs (Incluyendo PT), tal como se mencionó en el modelo No.1, y en la hipótesis planteada anteriormente.

En el modelo No.2, se puede concluir los siguientes aspectos en cuanto al tiempo de solución y la función objetivo. El tiempo de solución aumenta en mayor medida si se aumenta el número de centros de distribución, y la función objetivo, es influenciada de forma positiva por el número de PD y negativamente por el número de CD. En otras palabras, el sufrimiento de la población total afectada aumenta a medida que hay más puntos de demanda a atender, pero si existen cada vez más centros de distribución existe una mayor capacidad de ayuda lo que permite una disminución en este sufrimiento. Con base en la Tabla 9.2, se puede evidenciar que al igual que para el modelo No.1, para problemas relativamente pequeños los tiempos de solución

resultaron ser satisfactorios, pero a medida que crece el número de nodos, el tiempo computacional se incrementa hasta que exceder las capacidades de CPLEX. Al considerar la restricción computacional que impone CPLEX, es posible afirmar que el modelo podría funcionar para una gran cantidad de problemas reales y comunes, pero no posibilitaría su aplicación en algunos otros casos que podrían ocurrir en el mundo real, razón por la cual se confirma nuevamente la necesidad de elaborar metodologías para resolver largas instancias del problema.

## 9.3. Análisis de Sensibilidad

Para comprobar la hipótesis al inicio del capítulo referente a que se espera similitud en el comportamiento de los dos modelos, en esta sección se realizará un análisis de sensibilidad teniendo en cuenta los parámetros de entrada. Tanto para el modelo No.1, como para el modelo No.2.

### 9.3.1. Análisis del modelo No.1

En el modelo No.1 después de realizar pruebas computacionales resulta muy evidente que entre los parámetros de entrada el **capital inicial** tiene un efecto en el tiempo de solución. Esta influencia del capital no permitió realizar un mayor análisis para otros parámetros, lo que obligó a analizar el comportamiento del modelo No.1, solamente teniendo en cuenta este parámetro. La figura 9.2 representa el sensibilidad de la función objetivo y el tiempo de solución para un problema de pequeña escala el cual tiene 7 *CDs*, 1 *PT* y 14 *PDs*, con referencia al capital. El eje-x de la figura 9.2 se refiere al porcentaje de capital disponible en tiempo  $t = 0$ , este porcentaje es determinado de acuerdo al total del dinero requerido para comprar todos los palets que necesita la demanda. Además, esta figura en discusión posee dos ejes-y. El eje principal está relacionado con la función objetivo y se puede notar que cuando el capital disponible al principio del horizonte de planeación es muy pequeño, la demanda total no puede ser totalmente servida y el sufrimiento humano medido en la función objetivo tiende a ser alta. A su vez, debido a la falta de recursos la mayoría de las variables de decisión tomarán valores de cero. Como resultado, es posible tener tiempos de solución relativamente bajos como lo demuestra el eje



secundario (además de esto es necesario considerar el tamaño del problema). En adición, cuando el capital aumenta la función objetivo tiende a decrecer, aunque cada vez es más difícil encontrar la solución óptima del modelo, reflejado en el aumento del tiempo de solución.

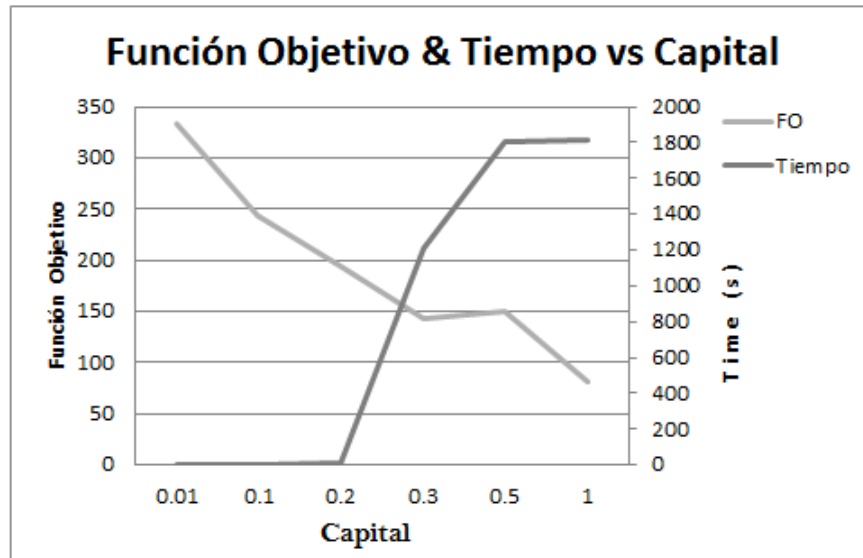


Figura 9.2: Tiempo y función objetivo versus Capital

Como se mencionó antes, en esos casos en los cuales el tiempo de solución incrementa (ya sea debido al valor del capital o el tamaño del problema), es necesario tener caminos alternativos para resolver el problema. En el capítulo 10 se propone una metodología de solución que puede contribuir a resolver los problemas cuando las capacidades de CPLEX se exceden y cuando el tiempo de solución óptima es muy largo para las necesidades de un problema de logística humanitaria.

### 9.3.2. Análisis del modelo No.2

Las características del modelo No.2 permitieron hacer un mayor análisis con respecto a una mayor cantidad de parámetros, con respecto al modelo No.1. En esta sección, se discutirá una serie de análisis de sensibilidad. En este caso se tendrán en cuenta unos nuevos parámetros que permitirán realizar ajustes a las condiciones de la generación de los problemas aleatorios. Estos nuevos parámetros son: (i) un

factor que amplifique los valores de capacidad de inventario que pueden tener los CD ( $\Theta$ ), (ii) un factor que amplifique los valores de disponibilidad de capital para las acciones de logística humanitario ( $\Pi$ ) y (iii) el número esperado de mano de obra en los centros de distribución ( $\Lambda$ ).

El parámetro de amplificación de capital ( $\Pi$ ) hace referencia a un número decimal mayor que 0.0. Este parámetro determina el porcentaje disponible del dinero total requerido para comprar la cantidad exacta de palets necesarios para suplir completamente la demanda. Por ejemplo, suponga que un palet cuesta 100 unidades monetarias (u.m.) y se tiene una demanda de 10 palets. Si  $\Pi = 1$ , significa que el sistema cuenta con 1000 u.m., por otro lado si  $\Pi = 1,5$  significa que el sistema cuenta con 1500 unidades monetarias, este cálculo se realiza de acuerdo al valor de  $\Pi$  y depende de las demandas aleatorias de cada problema generado.

El parámetro de amplificación de inventario  $\Theta$ , así como  $\Pi$  es un número continuo mayor que 0.0. En este caso  $\Theta$  indica el porcentaje del inventario disponible en todos los *CDs* del inventario total requerido para suplir completamente la demanda. El valor de inventario calculado que se obtenga se repartirá aleatoriamente entre los *CDs*, excluyendo el *CDP* cuyo inventario es infinito.

Finalmente,  $\Lambda$  es un número entero que significa el número promedio de capital humano disponible en cada *CD*, este valor permitirá repartir aleatoriamente la cantidad de personal en cada *CD*.

En este análisis se evalúan dos resultados, específicamente el valor del sufrimiento (basado en la función objetivo), y el tiempo de solución. El análisis se trabaja de la siguiente manera: se establece un conjunto de  $G$  valores para cada parámetro a evaluar. Es decir se genera un problema con todos los parámetros estáticos excepto el que se debe evaluar, y se obtienen los valores de cada uno de los resultados para cada nivel  $g$  del parámetro que se esté evaluando.

Se realizan diez réplicas para cada nivel de cada parámetro en estudio. Se consideran problemas con solamente 30 *CDs* y 50 *PDs* incluyendo puntos de demanda aislados, no aislados y de transferencia. Cada análisis de sensibilidad posee una tabla que resume los resultados, señalando el valor promedio de la función objetivo, el tiempo promedio y el tiempo máximo de solución. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

■ Valor de amplificación en la capacidad de inventario  $\Theta$

$\Theta$	Función Objetivo	Tiempo	Tiempo Máx.
0,01	1892,93	12	16
0,1	1750,96	19	33
0,2	1752,79	20	36
0,3	1760,44	23	34
0,4	1747,90	23	33
0,5	1718,40	22	37
0,6	1748,12	22	31
0,7	1710,43	18	38
0,8	1767,03	29	74
0,9	1721,96	22	31
1	1745,49	19	36
1,5	1748,03	25	39
2	1766,74	18	28
3	1727,45	16	25
4	1758,23	25	37

Cuadro 9.3: Análisis de sensibilidad factor  $\Theta$

Al realizar el análisis de varianza, teniendo en cuenta los datos obtenidos para la generación de la tabla 9.3, se tienen las siguientes conclusiones con un nivel de confianza del 95,0 %: (i) no hay una relación estadística significativa entre el valor de amplificación del inventario  $\Theta$  y la función objetivo, y (ii) no hay una relación estadística significativa entre  $\Theta$  con el tiempo de solución. Estas conclusiones se toman debido a que el valor-P es mayor que 0.05 en las tablas ANOVA C.3 y C.4 en Apéndice C.

Los resultados obtenidos con este análisis, con respecto a los niveles de inventario en los *CDs* apartes del *CDP*, permiten pensar lo siguiente: al trabajar el modelo No.2, con el supuesto de la existencia de un centro de distribución principal con una capacidad infinita, se podría tener como consecuencia que sea muy poco influyentes los niveles de inventario en centros de distribución, pues el *CDP* podría servir toda la demanda y poder minimizar el sufrimiento de acuerdo a su capacidad, lo que afectaría poco la función objetivo.

- Valor de amplificación en la capacidad de capital II

II	Función Objetivo	Tiempo	Tiempo Máx.
0,01	1987,15	13	21
0,1	1752,22	22	33
0,2	1703,42	20	42
0,3	1752,51	20	32
0,4	1766,34	19	39
0,5	1746,63	20	32
0,6	1779,29	17	24
0,7	1760,01	25	37
0,8	1772,48	20	36
0,9	1758,22	20	38
1	1784,59	20	34
1,5	1748,03	25	39
2	1744,04	26	57
3	1741,24	22	36
4	1685,67	25	46

Cuadro 9.4: Análisis de sensibilidad factor de amplificación capital II modelo No.2

La conclusión que se obtiene con el valor de amplificación del Capital, después de realizar el análisis de varianza con los datos que generaron la Tabla 9.4, se puede concluir con un nivel de confianza del 95,0 %, que hay una relación estadísticamente significativa entre el valor de amplificación del capital y la función objetivo, y además el tiempo de solución. Esta conclusión se da como consecuencia, al saber que el valor-P es menor que 0.05, en las tablas ANOVA C.5 y C.6 en Apéndice C.

Basado en los resultados encontrados, la relación que se encuentra entre el valor de la amplificación del capital y la función objetivo es decreciente, esto se debe a que cuando aumenta el capital el sufrimiento reflejado en la función objetivo tiende a disminuir, pues se tiene dinero para suplir las necesidades de la población afectada, caso contrario sucede cuando se disminuye el capital, pues cada vez serían menos las personas atendidas, lo que trae como consecuencia un aumento en el sufrimiento de la población o en la función objetivo. Por otro lado la relación con respecto al tiempo es ascendente, a medida que hay más

capital es necesario un mayor esfuerzo computacional para obtener las variables de decisión. Este resultado confirma el análisis que se realizó en modelo No.1 con respecto al valor del capital inicial.

- Número esperado de trabajadores en cada  $CD$  ( $\Lambda$ )

$\Lambda$	Función Objetivo	Tiempo	Tiempo Máx.
5	1874,484678	22,3923	61,132
10	1773,046397	20,0733	45,116
20	1599,675751	18,3314	29,945
30	1482,270744	19,0142	29,474
40	1350,125428	31,7011	67,346
50	1309,584783	47,1423	172,472
60	1224,472038	90,1223	335,691
70	1125,511776	115,1217	390,73
80	1051,365313	730,9296	1889,135
90	1047,886455	1377,2948	1891,614
100	907,4976125	1159,0787	1873,275

Cuadro 9.5: Análisis de sensibilidad factor de mano de obra modelo 2

Después de realizar el análisis de varianza con los datos que generaron la Tabla 9.5, se puede concluir con un nivel de confianza del 95,0 %, que hay una relación estadísticamente significativa entre el valor del número de trabajadores ( $\Lambda$ ) y la función objetivo, y además el tiempo de solución. Esta conclusión se da como consecuencia, al saber que el valor-P es menor que 0.05, en las tablas ANOVA C.7 y C.8 en Apéndice C.

Basado en los resultados encontrados, la relación que se encuentra entre el número de trabajadores y la función objetivo es decreciente, esto se debe a que cuando aumenta el número de trabajadores el sufrimiento reflejado en la función objetivo tiende a disminuir, pues se tiene una mayor capacidad de empaque y se podrá suplir las necesidades de la población afectada, caso contrario sucede cuando se disminuye el número de trabajadores, pues cada vez serían menos las personas atendidas, lo que trae como consecuencia un aumento en el sufrimiento de la población o en la función objetivo. Por otro lado la relación

con respecto al tiempo es ascendente, a medida que hay más personas disponible en las acciones de empaque, existe un mayor esfuerzo computacional para obtener las variables de decisión. Es posible observar que al tener en promedio desde 80 trabajadores en cada centro de distribución existe la posibilidad que el tiempo de solución sea mayor que 1800 segundos o media hora. En este caso se podría considerar como un parámetro muy influyente en el tiempo computacional, y se podría comparar con el parámetro de capital en el modelo No.1.

En cuanto a los parámetros de entrada de la generación de problemas en el modelo No.2, se puede decir que el capital de dinero y el número de trabajadores en cada *CD*, son parámetros influyentes significativamente tanto en el tiempo, como en la función objetivo. Sin embargo, en cuanto al número de trabajadores, es posible pensar que en tiempos de desastre y de escasez de recursos, sea relativamente limitado el número de personal disponible para realizar tareas de empaque de los kits. En el caso analizado en esta sección, al tener 30 *CDs* con un espacio limitado, con aproximadamente 10 personas, la ayuda humanitaria contaría con 300 personas para ayudar a empacar productos para 40 *PDs*, resulta un poco complicado un escenario con 100 personas por cada *CD* con un espacio muy limitado. Dada las características del problema antes planteadas, se trabajará el siguiente análisis con el escenario pesimista que considere un valor esperado de 10 personas por cada centro de distribución, por sus características de espacio limitadas.

### Diseño factorial en modelo No.2

Debido a que existe cierta relación entre el valor de la función objetivo y el tiempo de solución, con respecto tanto a parámetros de entrada, como al tamaño del problema, se probará a través de un diseño de experimento factorial  $2^4$ , con una réplica, el impacto que tienen estos factores en las variables de respuestas antes planteadas. Los factores en estudio y sus valores se muestran en la Tabla 9.6.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este diseño de experimento, el valor de la función objetivo es significativamente dependiente al número de puntos de demanda, y en menor medida al número de centros de distribución como se evidencia en la Figura C.10 en Apéndice C. Este análisis confirma la hipótesis mencionada

Nombre del Factor	Bajo	Alto	Factor Estandarizado
Centros de distribución	30	50	A
Puntos de demanda	50	100	B
Amplificación inventario	0.1	1.5	C
Amplificación Capital	0.1	1.5	D

Cuadro 9.6: Diseño del experimento

anteriormente con respecto al tamaño, sin embargo con respecto a los parámetros de capital e inventario se estaría rechazando con una confianza del 95 % la existencia de una relación estadísticamente significativa con la función objetivo.

Por otro lado, con respecto al tiempo los resultados demuestran que siguen siendo significativos el número de puntos de demanda, así como el número de centro de distribución. En este caso es mucho más significativo el aporte del número de CDs y se evidencian los resultados encontrados anteriormente, como se muestra en la Figura C.12 en Apéndice C. Además existen dos iteraciones significativas, relacionadas al tamaño (número de CD y DP) y a la relación número de puntos de demanda y capital.

## 9.4. Conclusiones de Experiencia computacional

En el capítulo de experiencia computacional se pueden establecer las siguientes conclusiones, con respecto a la hipótesis planteada al inicio del capítulo:

- Existe un comportamiento similar para ambos modelos en cuanto a la relación existente entre el tiempo de solución y la función objetivo, con respecto al tamaño del problema, (número de nodos).
- El comportamiento de los modelos con respecto a los valores que pueden tomar los parámetros difiere. Por ejemplo, en el modelo No.1, el parámetro más influyente en el tiempo de solución y la función objetivo es el valor del capital, mientras que en el modelo No.2, el parámetro más influyente es el número personas disponibles en cada centro de distribución.

---

En el siguiente capítulo se enunciarán metodologías para obtener soluciones cuando el tiempo de solución se ve afectado por las características del problema, asociadas tanto al tamaño, como a los parámetros influyentes.



---

# Capítulo 10

## Instancias grandes del problema

En este capítulo se enunciarán tres métodos de solución para resolver el problema en escenarios en los que se espera que el tiempo de solución sea muy alto o cuando el problema exceda las capacidades que ofrece CPLEX. Estas metodologías de solución tienen como característica común el hecho de buscar disminuir la complejidad del problema y así poder resolverlo, basados en la lógica de que al dividir el problema se podrá resolver. En esta sección se realizarán pruebas de validez para cada una de las propuestas de solución. A partir de estas pruebas se identificarán recomendaciones para su uso.

Con las recomendaciones se esperan obtener resultados aceptables en cuanto a eficacia y eficiencia. Las propuestas metodológicas se enuncian a continuación:

- **Método No.1** El primer método considera resolver los modelos enteros (modelo No.1 y modelo No.2), dividiéndolos en  $T$  sub-problemas (donde  $T$  es el número de periodos de tiempo del problema a resolver). En este primer método, se considera la solución del problema entero como la suma de las soluciones de cada tiempo asociado al problema en contexto. Naturalmente, se podría terminar con soluciones sub-óptimas pero que se espera que sean conseguidas con mayor rapidez que la solución óptima global.
- **Método No.2** El segundo método es una modificación del primero. Igualmente se dividirá el problema en  $T$  sub-problemas, como en el método No.1, pero además se considera la división de cada sub-problema en dos etapas; en la

etapa No.1 se resuelve el problema de distribución (y empaque en modelo No.2) que concierne a los  $CDs$  a los  $PDs$  aislados usando los  $PTs$ , y en la etapa No.2, se resuelve el problema de distribución (y empaque en modelo No.2) considerando  $CDs$  y  $PDs$  no aislado, teniendo en cuenta los valores de las variables de decisión que se obtuvieron en la etapa No.1.

- **Método No.3** El método No.3 considera igualmente la división del problema como se explica en el método No.1, pero dentro de cada sub-problema es usado un algoritmo híbrido para obtener la solución. De igual manera, la solución del problema completo es la suma de las soluciones encontradas por el algoritmo híbrido en cada periodo de tiempo del horizonte de planeación.

El algoritmo híbrido del método No.3, incluye un algoritmo voraz como el mencionado en (Berkoune et al., 2012) y también un recocido simulado. La descripción del algoritmo voraz y del recocido simulado, es como sigue:

- **Algoritmo voraz**

El algoritmo voraz es llamado 'Set enumeration heuristic'(SEH), y la principal característica es asignar los vehículos disponibles en cada  $CD$  a cada  $PD$ , hasta que la demanda de todos los puntos se satisfagan o se acabe la capacidad disponible. El algoritmo voraz trabaja con tres listas: (1) lista  $S$ , (2) lista  $E(S_m)$  y (3) lista  $H(E(S_m))$ .

- La lista  $S$  está compuesta de la siguiente dupla:  $(i, v)$  (i.e. centros de distribución  $i \in \mathbb{CD}$  y vehículo tipo  $v \in \mathbb{V}$ ), esta lista es de tamaño  $DC * V$ . Por ejemplo considere tres  $CDs$  con dos tipos de vehículos  $V$  en cada  $CD$ , una posible lista podría ser:  $S = ((i_1, v_1), (i_1, v_2), (i_2, v_1), (i_2, v_2), (i_3, v_1), (i_3, v_2))$ .
- La lista  $E(S_m)$  está compuesta de la siguiente dupla:  $(j, f)$  (i.e. puntos de demanda  $j \in \mathbb{PD}$  y tipo de palet  $f \in \mathbb{F}$ ). Un ejemplo de una lista  $E(S_m)$ , para un caso donde tres  $PDs$  con dos tipos de palets  $F$  en cada  $PD$  podría ser:  $E(S_m) = ((j_1, f_1), (j_1, f_2), (j_2, f_1), (j_2, f_2), (j_3, f_1), (j_3, f_2))$ .
- La lista  $H(E(S_m))$  está compuesta de la siguiente dupla:  $(c, b)$  (i.e. punto de transferencia  $c \in \mathbb{PT}$  y vehículo especial  $b \in \mathbb{B}$ ). Esta lista es

usada cuando en la combinación  $(f, j)$  en la lista  $E(S_m)$ ,  $j$  es un  $DP$  aislado.

El procedimiento del algoritmo voraz considera recorrer cada una de las listas en un orden específico desde su primer elemento hasta su último elemento, o hasta que las capacidades del problema lo permiten. Un ejemplo del comportamiento del algoritmo voraz, se describe a continuación:

- Para un  $t$  dado, se empieza el algoritmo con primer par de la lista  $S$   $(i_1, v_1)$  y el primer par en la lista  $E(S_m)$   $(j_1, f_1)$ . Luego, se definen las variables de decisión que están involucradas en esta combinación  $(i_1, v_1, j_1, f_1)$ , respondiendo preguntas como: ¿cuántos viajes se puede hacer desde  $CD_{i_1}$  a  $PD_{j_1}$  usando vehículo  $V_{v_1}$   $(X_{v_1, i_1, j_1, t})$ , cumpliendo todas las restricciones? o ¿cuál es la cantidad de palets tipo  $F_{f_1}$  a enviar desde  $CD_{i_1}$  a  $PD_{j_1}$  usando vehículo  $V_{v_1}$   $(Q_{v_1, f_1, i_1, j_1, t})$ , cumpliendo todas las restricciones?, entre otras. Si el  $PD_{j_1}$  es un punto de demanda aislado es necesario la inclusión del primer par en la lista  $H(E(S_m))$ , en este caso se deben obtener las variables de decisión, pero incluyendo la combinación  $(c_1, b_1)$ .

Las variables de decisión se obtienen al utilizar modelos de programación entero, para el modelo No.1 se propone una opción la cual considera solamente dos modelos enteros y se describen D.1 en Apéndice D. Por otro lado en el modelo No.2 se proponen dos opciones:

- ◊ La opción (A) considera tres modelos enteros para obtener las variables de decisión y se describen en D.2.1 en Apéndice D.
- ◊ La opción (B) considera dos modelos enteros para obtener las variables de decisión y se describen en D.2.2 en Apéndice D.

El recorrido de las listas se finaliza por ciertas condiciones, como sigue:

- ◊ Si se acaba la demanda de palets  $f$  en  $PD$   $j$  en el par  $(f_1, j_1)$ , ir al siguiente par de la lista  $E(S_m)$
- ◊ Si el vehículo especial  $b$  en  $PT$   $c$ ,  $(b, c)$  no tiene tiempo disponible para seguir la operación, ir al siguiente par de la lista  $H(E(S_m))$
- ◊ Si el vehículo  $v$  en  $CD$   $i$   $(v, i)$ , no tiene tiempo disponible para seguir la operación, también si no hay inventario de palets en  $CD$

$i$  en modelo No.1 o si no hay inventario de productos en CD  $i$  en modelo No.2, ir al siguiente par de la lista  $S$

◊ Si no hay capital, finalizar el algoritmo en todas las listas

La solución del problema resultante del algoritmo voraz del método No.3, está influenciada por el orden de las listas. En este sentido, se propone un orden para la lista  $S$ , la lista  $H(E(S_m))$  y la lista  $E(S_m)$ , basado en ciertas características de sentido común, debido a que después de probar órdenes aleatorios los resultados fueron insatisfactorios, por ejemplo:

- En la lista  $S$ , se propone organizar la lista teniendo en cuenta ciertas características: (i) el número de vehículos tipo  $v$  disponibles, (ii) el inventario de productos o palets que tenga disponible, (iii) número de puntos de cobertura en el centro de distribución y (iv) el costo promedio de viaje desde el centro de distribución con el vehículo  $v$ . Se espera que la primera dupla  $(i, v)$ , sea aquel centro de distribución con mayor número de vehículos, con el mayor inventario disponible de productos, además que sea el punto que tenga mayor cobertura y que tenga el menor costo promedio de viaje. Este resultado se obtiene por medio de una medida estandarizada de estos parámetros.
- En la lista  $H(E(S_m))$ , se propone organizar de manera similar a la lista  $S$ , pero haciendo el análisis para el número de vehículos especiales  $b$  y el número de puntos de transferencia excluyendo el inventario disponible.
- En la lista  $E(S_m)$ , se propone organizar de acuerdo al nivel de prioridad.

### Recocido simulado

Para mejorar el comportamiento del algoritmo voraz, se utiliza la meta-heurística de recocido simulado. En este sentido, al establecer que el resultado que se obtiene del SEH depende del orden de las listas, se decide tratar de re-ordenar las listas, pero usando el orden lógico dado por una meta-heurística conocida.

El algoritmo de recocido simulado empieza con la solución obtenida en el SEH. En cada iteración del algoritmo de recocido simulado se obtiene un vecino, cambiando el orden de un par de posiciones dentro del vector, por ejemplo, si

$S = [0, 1, 2, 3]$ , un vecino podría ser  $S' = [1, 0, 2, 3]$ . Se obtienen los valores de las variables de decisión y la función objetivo como se explicó en el algoritmo voraz (recorriendo las listas, pero con el nuevo orden establecido, con el nuevo vecino). Al obtener los resultados del nuevo vecino, se podría obtener una función objetivo mejor o peor a la actual, luego se tiene la opción de mantener la solución actual o cambiarla. La probabilidad de cambiar depende de una comparación entre la función objetivo del nuevo vecino y el actual mejor objetivo. Este proceso sigue hasta que la temperatura del algoritmo sea la más baja. En el caso actual, la temperatura depende del tiempo límite que se decida.

Teniendo en cuenta los tres enfoques mencionados anteriormente, se han desarrollado una serie de pruebas computacionales para el modelo No.1 y para el modelo No.2.

## 10.1. Resultados de métodos de solución relacionados al modelo No.1

En el caso del modelo No.1, se pretende hacer un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en las metodologías de solución No.1 y No.2, y el resultado obtenido por el algoritmo de CPLEX (MIP). Basado en los resultados encontrados en el capítulo 9, se realizará un análisis especial cuando se manipula los valores de capital en un problema determinado. En este sentido se buscará saber que tan sensibles son las metodologías a los valores que puede tomar el capital y cuál de las dos metodologías podría ser recomendable. Para obtener el análisis deseado, se pondrá a prueba el modelo No.1 ante dos escenarios distintos. El primer escenario considera problemas de pequeña escala. En este caso se variará el valor del capital y se establecerán las decisiones en escenarios donde el tiempo de solución es muy alto. Por otro lado, se trabajará en un caso de mayor escala, que considerará un problema de 100 *CDs* y 150 *PDs*.

### 10.1.1. Análisis y resultados de implementación de metodologías de solución No.1 y No.2 para instancias pequeñas y diferentes niveles de capital

En esta instancia pequeña se pone a prueba el modelo No.1, ante tres escenarios aleatorios de tamaño 7 *CDs* y 15 *PDs*. El tamaño del problema en este caso no es la principal influencia en el tiempo de solución, sino por el contrario el valor del capital. En el análisis se prefiere realizar una comparación entre las metodologías No.1 y No.2, limitando el tiempo de solución en distintos niveles, desde 10 s hasta 3600 s (1 hora). A partir de los resultados se realizarán las recomendaciones respectivas:

- 50 % del dinero total requerido para comprar toda la demanda: En la figura 10.1 la función objetivo en opción No. 1(O1) se obtiene en 6.37 s y la función objetivo en opción No. 2(O2) se obtiene en 161 s.

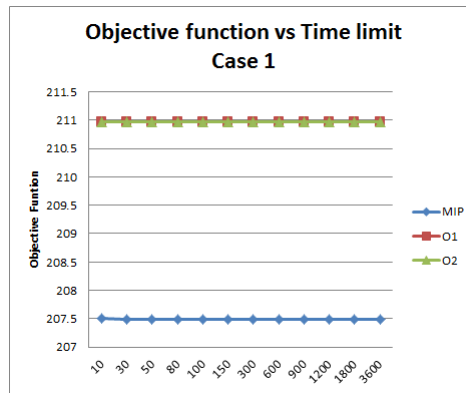


Figura 10.1: Función objetivo vs Tiempo límite : 7 DC and 15 DP

- 100 % del dinero total requerido para comprar toda la demanda requerida: En la figura 10.2 la función objetivo en opción No. 1(O1):se obtiene en 2.86 s y la función objetivo en la opción No. 2(O2) se obtiene en 4.06 s.
- 150 % del dinero total requerido para comprar toda la demanda requerida: En la figura 10.3 la función objetivo en opción No. 1(O1)

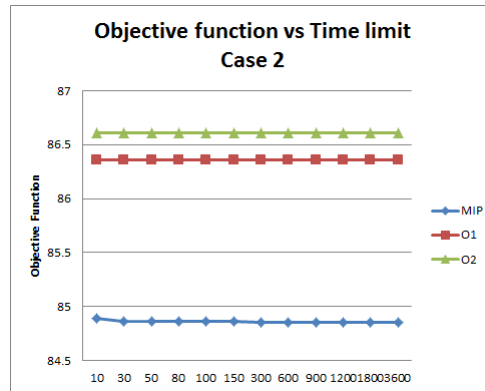


Figura 10.2: Función objetivo vs Tiempo límite : 7 DC y 15 DP

se obtiene en 33.95 s y la función objetivo en la opción No. 2(O2) se obtiene en 24.67 s.

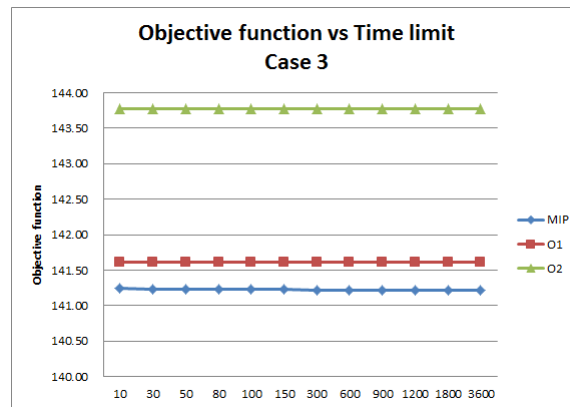


Figura 10.3: Función objetivo vs Tiempo límite : 7 DC y 15 DP

### Política de decisión modelo No.1 pequeña escala.

De acuerdo a las figuras 10.1, 10.2, y 10.3 se observa claramente que resulta mucho mejor limitar el tiempo de solución del problema entero completo (MIP) que esperar resultado de las metodologías propuestas.

### 10.1.2. Análisis y resultados de implementación de metodologías de solución No.1, No.2 y No.3 para instancias largas y diferentes niveles de capital

En esta instancia grande se pone a prueba el modelo No.1, ante escenarios aleatorios de tamaño 100 *CDs* y 150 *PDs*. El tamaño del problema en este caso tiene una influencia mayor en el tiempo de solución del problema, sin embargo se analizará el comportamiento de los resultados ante cuatro distintos valores del capital. En el análisis se prefiere realizar una comparación entre las metodologías No.1, No.2 y No.3, limitando el tiempo de solución en distintos niveles, desde 200 s hasta 1800 s (30 min). A partir de los resultados se realizarán las recomendaciones respectivas:

- 50 % del dinero total requerido para comprar toda la demanda

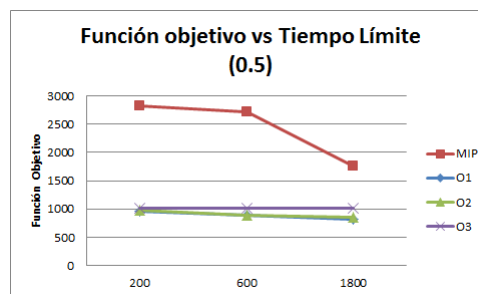


Figura 10.4: Función objetivo vs Tiempo límite : 100 DC y 150 DP

- 100 % del dinero total requerido para comprar toda la demanda requerida

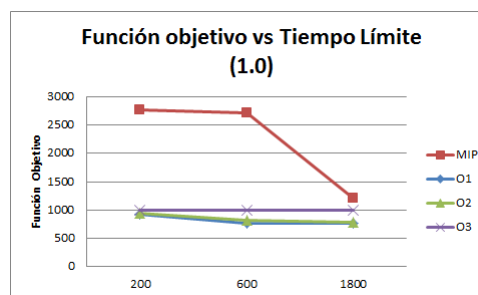


Figura 10.5: Función objetivo vs Tiempo límite : 100 DC y 150 DP



- 150 % del dinero total requerido para comprar toda la demanda requerida

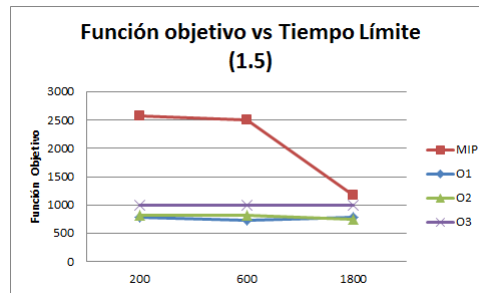


Figura 10.6: Función objetivo vs Tiempo límite : 100 DC y 150 DP

- 200 % del dinero total requerido para comprar toda la demanda requerida

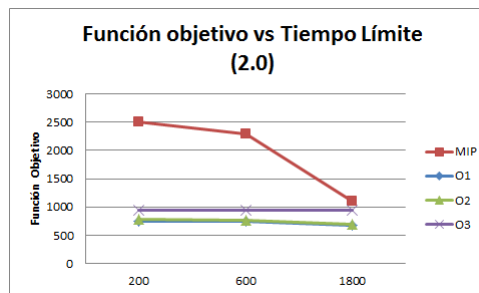


Figura 10.7: Función objetivo vs Tiempo límite : 100 DC y 150 DP

### Política de decisión modelo No.1 gran escala.

En las figuras 10.4, 10.5, 10.6 y 10.7 se comparan los resultados obtenidos por cada metodología limitando el tiempo de solución de acuerdo al eje-x. La función objetivo de la opción No.3 (O3) se obtuvo en 130 s para todas las figuras antes mencionadas. Notar que para todos los tiempos límites propuesto la opción metodológica No.1 domina a todas las demás. Sin embargo, resulta interesante saber que el método No.3 obtener resultados muy cercanos en un tiempo de solución menor.

## 10.2. Resultados de métodos de solución relacionados al modelo No.2

En el análisis del modelo No.2, se pretende encontrar las respuestas a las siguientes preguntas: (i) ¿Que metodología de solución se considera como la mejor en cuanto a tiempo y diferencia en la función objetivo en la etapa de validez? y (ii) ¿cuáles son las recomendaciones de uso?

En consecuencia, se requiere analizar y validar las soluciones metodológicas propuestas, teniendo en cuenta dos aspectos principales: (i) el tamaño del problema y (ii) el parámetro del número promedio de mano de obra ( $\Lambda$ ). Para responder estas preguntas, se analizarán los resultados bajo dos conjuntos de escenarios: (i) un escenario pesimista con un  $(\Lambda) = 10$ , y (ii) un escenario optimista con un  $(\Lambda) = 50$ .

### 10.2.1. Análisis y resultados de implementación de metodologías de solución No.1, No.2 y No.3 en un escenario pesimista: Mano de obra ( $\Lambda$ )

Para el escenario pesimista, se analizará el comportamiento de las metodologías propuestas en problemas de distintos tamaños, considerando un número de mano de obra esperada ( $\Lambda$ ) de 10 personas. En este análisis se generaron aleatoriamente los parámetros de entrada, tal como se explica en la sección 9.1. Además se proponen 12 instancias del problema cada uno con diez repeticiones, es decir 120 observaciones. Esos problemas fueron resueltos con los métodos de solución propuestos y se validaron con los resultados obtenidos al resolver el modelo No.2 usando CPLEX y se decidió limitar el tiempo de ejecución en 1800 s (es decir 30 minutos). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.1, la cual contiene el valor promedio de tiempo y el tiempo máximo de solución por cada instancia del problema, y cada la metodología de solución. La Tabla 10.2 indica el valor promedio de la función objetivo y el porcentaje de diferencia en cuanto a la función objetivo, por cada instancia del problema y por cada una de las metodologías solución.

Los resultados obtenidos en estas pruebas, permiten contestar las preguntas propuestas en el escenario pesimista. Los resultados obtenidos en el escenario pesimista

del modelo No.2, permiten establecer las siguientes conclusiones:

- **Política No.1 en escenario pesimista:** se establece que la metodología de solución que no se recomendaría en ningún caso es la metodología No.2. Entre sus falencias se encuentra que su diferencia porcentual resulta ser muy alejada de lo esperado, por ejemplo una máxima diferencia de 11,3 %. Este resultado es razonable, si se piensa que se pueda dar el caso de que al dividir el problema no se pueda responder a un PD no aislado con una gran urgencia en la etapa No.2 del algoritmo. Esto sucedería sí en la etapa No.1 se gastan todos los recursos en un punto aislado que no tenga más urgencia que el mencionado anteriormente. Si se invirtiera el orden de solución entre la etapa No.1 y la etapa No.2 del método No.2, se esperaría el mismo problema.
- **Política No.2 en escenario pesimista:** En este escenario pesimista, existe evidencia para establecer que la opción metodológica No.1 es la que más se acerca al valor óptimo independientemente al tamaño del problema. Por ejemplo, la máxima diferencia porcentual encontrada fue de 0,6 %. Además, si se compara el resultado de cada una de las metodologías con la solución factible encontrada por el algoritmo en 1800 s, como se observa en las dos últimas filas de la Tabla 10.2, se puede notar que la opción metodológica No.1 tiene las mayores diferencias porcentuales a favor. Por ejemplo, cuando se probó un escenario con 100 *CDs* y con 400 nodos entre *PTs* y *PDs*, CPLEX necesitó aproximadamente 600 s para obtener la primera solución factible. Al comparar el resultado de la opción No.1 con la solución sub-óptima encontrada en 600 s, se tiene una diferencia de 15 % en favor de la opción No.1, la cual se obtiene en aproximadamente 150 s. En otro caso, cuando se consideran 200 *DCs* y 400 nodos, incluyendo *PTs* y *PDs*, no se puede obtener ninguna solución factible en menos de 1800 s resolviendo el modelo No.2 completo, sin embargo sí se puede obtener un resultado usando el método No.1. Por ese hecho, se puede concluir que en escenarios pesimistas como los estudiados en esta sección, el método No.1 tiene una buena capacidad de solución. En resumen, la Figura 10.8 representa el comportamiento de la opción No.1 dependiendo de cada instancia del problema, establecido en la Tabla 10.2. Note que cuando el tamaño del problema aumenta, el tiempo de solución incrementa, pero la capacidad de

solución de problemas grandes es mayor si se usa el método No.1, en vez de tratar de resolver el problema completo.

- **Política No.3 en escenario pesimista:** Por otro lado en este escenario pesimista, el método No.3 demuestra un buen comportamiento, con un rango de diferencias entre 0,5 % a 2,3 %. A pesar de ello, el método No.3 es sobrepasado por la metodología No.1. Sin embargo, no se debe descartar y se considera muy importante mejorar el comportamiento del este método en investigaciones futuras.

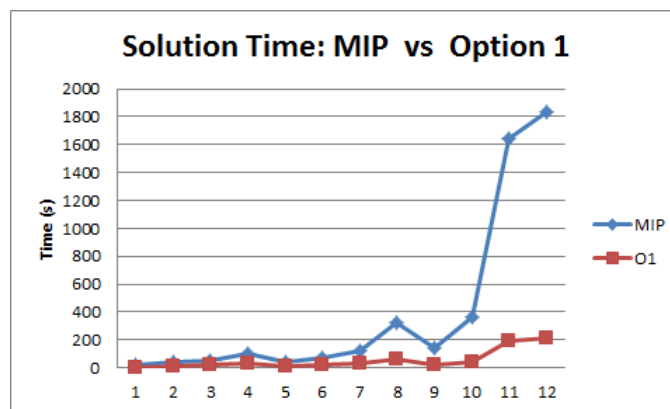


Figura 10.8: Opción No.1 vs MIP Modelo No.2: tiempo de solución

Nodos				MIP		Mét. No.1		Mét. No.2		Mét. No.3 (A)		Mét. No.3 (B)	
T	CD	PT	PD	Tiempo	T Max	Tiempo	T Max	Tiempo	T Max	Tiempo	T Max	Tiempo	T Max
4	30	10	40	25	39	5	7	6	7	5	6	5	6
4	30	20	80	39	60	12	16	23	98	9	28	7	15
4	30	30	120	50	86	17	19	12	15	8	16	6	6
4	30	60	240	106	162	31	36	22	29	9	13	7	8
4	50	10	40	41	63	10	12	11	18	12	36	8	11
4	50	20	80	73	102	17	18	55	117	12	22	9	11
4	50	30	120	125	218	30	78	221	1239	15	28	10	19
4	50	60	240	320	389	65	76	40	49	16	70	8	9
4	100	10	40	142	251	20	28	23	38	12	14	9	11
4	100	20	80	362	986	38	52	358	1865	21	52	12	34
4	100	100	300	1648,3	1881,3	190,76	228,66	104,87	151,76	43,46	121,61	25,99	115,51
4	200	50	150	1834,0	1937,0	208,64	281,21	767,81	1450,8	40,71	107,78	18,14	27,58

Cuadro 10.1: Metodologías vs MIP: tiempo de solución escenario pesimista.

Nodos				MIP		Mét. No.1		Mét. No.2		Mét. No.3 (A)		Mét. No.3 (B)	
T	CD	PT	PD	F.O		F.O	% FO	F.O	% FO	F.O	%FO	F.O	% FO
4	30	10	40	1748,03		1752,31	0,2 %	1929,92	10,4 %	1767,16	1,1 %	1772,89	1,4 %
4	30	20	80	3709,47		3716,65	0,2 %	4072,63	9,8 %	3738,34	0,7 %	3750,13	1,1 %
4	30	30	120	5752,12		5758,47	0,1 %	6157,02	7,0 %	5791,72	0,7 %	5807,51	1,0 %
4	30	60	240	12154,52		12164,47	0,1 %	12654,56	4,1 %	12205,70	0,4 %	12220,12	0,5 %
4	50	10	40	1700,72		1708,05	0,4 %	1828,36	7,5 %	1725,09	1,4 %	1733,19	1,9 %
4	50	20	80	3647,24		3654,58	0,2 %	4060,12	11,3 %	3674,95	0,8 %	3684,47	1,0 %
4	50	30	120	5646,71		5656,97	0,2 %	6076,68	7,6 %	5692,89	0,8 %	5715,25	1,2 %
4	50	60	240	11722,17		11735,39	0,1 %	12439,61	6,1 %	11777,34	0,5 %	11787,93	0,6 %
4	100	10	40	1408,09		1417,46	0,6 %	1522,77	8,1 %	1436,62	2,0 %	1440,20	2,3 %
4	100	20	80	3242,66		3256,61	0,4 %	3461,70	6,8 %	3291,46	1,5 %	3303,34	1,9 %
4	100	100	300	15176,47		14358,92	-5,3 %	15229,20	0,3 %	14591,36	-3,9 %	14486,80	-4,5 %
4	200	50	150	7211,35		6141,50	-14,8 %	6742,42	-6,5 %	6214,31	-13,8 %	6250,30	-13,3 %

Cuadro 10.2: Metodologías vs MIP: función objetivo escenario pesimista

### Análisis de sensibilidad metodología No.1 vs capital humano ( $\Lambda$ )

Como se anunció anteriormente, el posible valor de mano de obra promedio en cada  $CD$  es un parámetro que afecta el tiempo de solución, así como la función objetivo. En este caso, resulta necesario saber si el comportamiento de la opción No.1 se ve afectado por este parámetro. Para realizar un análisis preliminar se escoge el escenario de tamaño más bajos (que incluye 30  $CD$  y 50 nodos entre  $PDs$  y  $PTs$ ) y se replica 10 veces en cada nivel del parámetro en estudio. De acuerdo con la figura 10.9, el comportamiento de la opción No.1 en cuanto a la función objetivo no se ve evidentemente afectada, pero sí confirma que el tiempo de solución en la opción No.1 también resulta afectado por este parámetro.

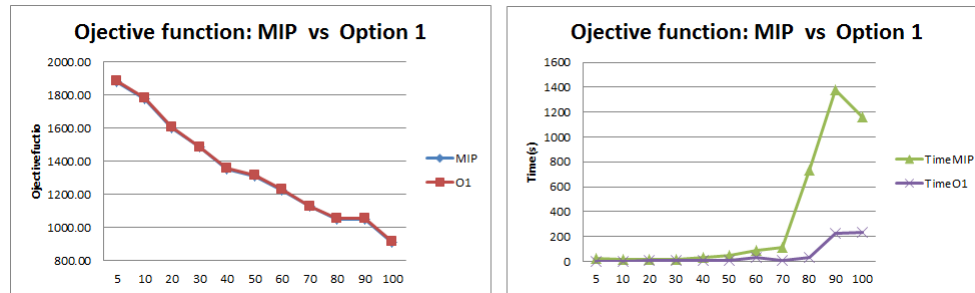


Figura 10.9: Análisis de sensibilidad MIP vs Opción No.1

Mano de obra	MIP			Opción 1		
	Función objetivo	Tiempo	Tiempo Max.	Función objetivo	Tiempo	Tiempo Max.
5	1874,484678	22,3923	61,132	1880.58	5	7
10	1773,046397	20,0733	45,116	1778.84	4	4
20	1599,675751	18,3314	29,945	1604.00	6	9
30	1482,270744	19,0142	29,474	1486.21	6	11
40	1350,125428	31,7011	67,346	1356.58	8	14
50	1309,584783	47,1423	172,472	1313.53	7	11
60	1224,472038	90,1223	335,691	1228.99	32	131
70	1125,511776	115,1217	390,73	1128.83	10	17
80	1051,365313	730,9296	1889,135	1056.23	32	237
90	1047,886455	1377,2948	1891,614	1052.22	224	1769
100	907,4976125	1159,0787	1873,275	912.90	236	1642

Cuadro 10.3: Analisis de sensibilidad de la cantidad promedio de mano de obra: MIP vs Opción 1

Los resultados encontrados permiten establecer que si el número de personas pro-

medio es menor o igual a 50 el comportamiento del tiempo de solución en escenarios con igual tamaño podría no exceder 50 % de diferencia. Para validar esta hipótesis, se evaluarán las metodologías usando un escenario optimista con un valor esperado de 50 personas disponibles como mano de obra para cada  $CD$ .

### 10.2.2. Análisis y resultados de implementación de metodologías de solución No.1, No.2 y No.3 en escenario optimista: Mano de obra

En el escenario optimista considera un valor esperado de 50 personas disponibles como mano de obra para cada  $CD$ , y se analizan los mismos 12 escenarios trabajados en el escenario pesimista, con las mismas condiciones. En esta sección se resuelven los problemas usando las metodologías propuestas No.1 y No.3 (descartando la No.2), y se comparan y validan con las soluciones encontradas por CPLEX al resolver el modelo No.2 completo, limitando el tiempo de solución en 1800 s (30 min). En la Tabla 10.4 se encuentra el tiempo promedio de solución y el máximo para cada problema y cada metodología de solución. En la tabla 10.5 se indica la función objetivo promedio para cada problema y la diferencia en la función objetivo para cada solución metodológica.

Note, que después de los resultados encontrados en este escenario optimista, estamos en capacidad de rechazar la hipótesis mencionada al finalizar el análisis realizado en el escenario pesimista (10.2.1), debido a que el tiempo de solución de la metodología No.1 se ve realmente afectado por el parámetro relacionado con la mano de obra en problemas de tamaños más pequeños que los encontrados en el escenario pesimista. A partir de ello, bajo un escenario como el optimista, no se recomienda usar el método No.1, en escenarios que tenga 100  $CD$ s y 400 nodos de  $PT$ s y  $PD$ s o más. En vez de ello, se incluye en el conjunto de recomendaciones la metodología No.3, específicamente la opción (B).

Además, se puede observar que en algunas instancias del problema en las que bajo un escenario pesimista requerían menos de 1800 s para obtener una solución óptima, en el caso optimista requieren más de 1800 s. A continuación se analizarán los resultados obtenidos en cinco instancias del problema limitando el tiempo de



solución en 200, 400, 600 y 1800 s. Además, se pretende determinar las políticas de recomendación para su uso:

- **Escenario con 50 CD y 80 nodos incluyendo PTs and PDs**

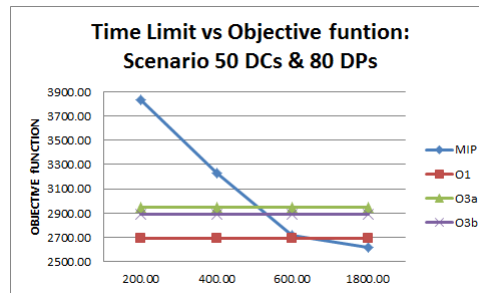


Figura 10.10: Función objetivo vs tiempo límite: 50 CD y 80 PD

En figura 10.10, se comparan los siguientes datos: (i) función objetivo opción No. 1 (O1): 2688.70, obtenido en 25 s. (ii) función objetivo opción No. 3a (O3a): 2951.06, obtenido en 40 s. (iii) función objetivo opción No. 3b (O3b): 2886.35, obtenido en 35 s.

- **Escenario con 50 CD y 120 nodos incluyendo PTs and PDs**

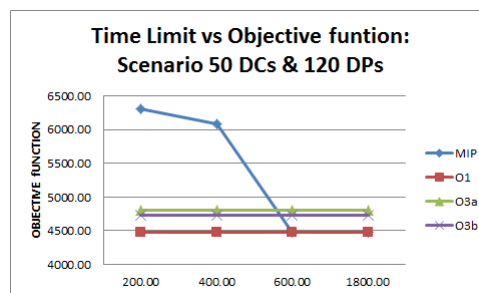


Figura 10.11: Función objetivo vs tiempo límite: 50 CD y 120 PD

En figura 10.11, se comparan los siguientes datos:

(i) función objetivo opción No. 1 (O1): 4474.09, obtenido en 40 s. (ii) función objetivo opción No. 3a (O3a): 4797.79, obtenido en 41 s. (iii) función objetivo opción No. 3b (O3b): 4722.19552, obtenido en 35 s

- **Escenario con 100 CD y 40 nodos incluyendo PTs and PDs**

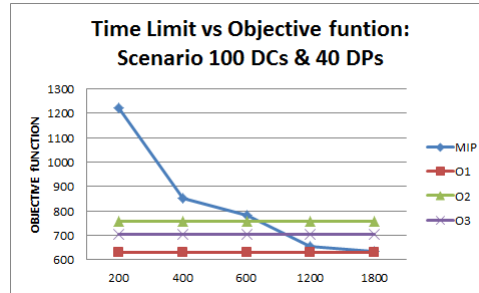


Figura 10.12: Función objetivo vs tiempo límite: 100 CD y 40 PD

En figura 10.12, se comparan los siguientes datos: (i) función objetivo opción No. 1 (O1): 630.5, obtenido en 43 s. (ii) función objetivo opción No. 3a (O3a): 758.7, obtenido en 53 s (iii) función objetivo opción No. 3b (O3b): 701.8, obtenido en 46 s

■ **Escenario con 100 CD y 80 nodos incluyendo PTs and PDs**

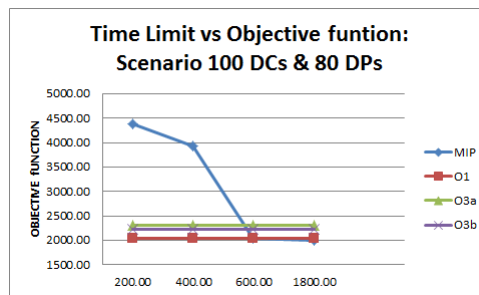


Figura 10.13: Función objetivo vs tiempo límite: 100 CD y 80 PD

En figura 10.13, se comparan los siguientes datos: (i) función objetivo opción No. 1 (O1): 2044.8, obtenido en 70 s. (ii) función objetivo opción No. 3a (O3a): 2311.2, obtenido en 48 s (iii) función objetivo opción No. 3b (O3b): 2228.9, obtenido en 44 s.

■ **Escenario con 100 CD y 400 nodos incluyendo PTs and PDs**

En figura 10.14, se comparan los siguientes datos: (i) función objetivo opción No. 3a (O3a): 12804.4, obtenido en 81 s (iii) función objetivo opción No. 3b (O3b): 12697.1, obtenido en 52 s

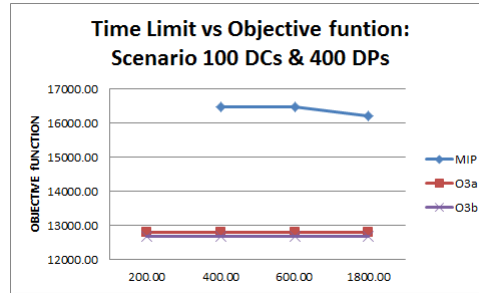


Figura 10.14: Objective function vs Time limit: 100 DC and 400 DP

**Política No.1 en escenario optimista:** Se recomienda usar la opción metodológica No.1 si se requiere obtener una solución en menos de 600 s, o como máximo se espera una mejora de 3 % de la solución si espero hasta que se resuelva el modelo completo después de 1800 s. Esta recomendación esta dada para los escenarios donde el problema tenga 50 CD y como máximo 120 nodos incluyendo PTs y PDs. Además, se recomienda para casos en los que el sistema cuente con 100 CD y máximo 80 nodos incluyendo PTs and PDs.

**Política No.2 en escenario optimista:** En escenarios con 100 CD y más de 100 nodos, la opción No.1 no trabaja como se espera. Por esta razón se descarta del análisis, y se recomienda la opción metodológica No.3 opción (B). Como resultado se tiene valores 23 % más baja que la solución obtenida al limitar el tiempo con 400 s, 600 s y 1800 s.

Nodos				MIP		Mét. No.1		Mét. No.3 (A)		Mét. No.3 (B)	
T	CD	PT	PD	Tiempo	T Máx.	Tiempo	T Máx.	Tiempo	T Máx.	Tiempo	T Máx.
4	30	10	40	28.49	99.15	7.18	10.32	29.98	31.89	29.25	32.69
4	30	20	80	82.42	183.39	14.10	21.13	36.41	42.56	30.93	33.83
4	30	30	120	142.38	605.00	21.89	40.80	35.80	44.05	36.44	42.42
4	30	60	240	172.34	646.71	43.39	62.32	69.52	164.92	37.42	46.57
4	50	10	40	75.72	194.27	11.18	15.08	46.00	49.60	41.62	44.98
4	50	20	80	1168.05	1861.57	24.68	44.98	41.65	47.58	35.55	46.02
4	50	30	120	1210.60	1837.92	41.67	52.90	43.88	60.57	33.09	36.12
4	50	60	240	562.38	1010.61	65.48	87.58	49.98	58.88	39.90	45.24
4	100	10	40	995.38	1852.17	43.02	142.97	49.95	64.98	43.92	53.76
4	100	20	80	1323.18	1839.07	90.66	142.97	50.81	94.29	46.23	65.66
4	100	100	300	1886.71	1912.46	537.64	2166.27	97.91	125.82	62.99	72.79
4	200	50	150	1875.68	1909.45	489.02	2693.84	104.58	140.44	80.94	146.85

Cuadro 10.4: Metodologías vs MIP: tiempos de solución escenario optimista.

Nodos				MIP		Mét. No.1		Mét. No.3 (A)		Mét. No.3 (B)	
T	CD	PT	DP	F.O		F.O	% FO	F.O	% FO	F.O	% FO
4	30	10	40	1280.95		1286.17	0.4 %	1395.47	8.9 %	1359.91	6.1 %
4	30	20	80	3039.55		3046.44	0.2 %	3263.97	7.4 %	3208.40	5.6 %
4	30	30	120	4893.22		4898.36	0.1 %	5169.16	5.6 %	5114.35	4.5 %
4	30	60	240	10959.28		10964.56	0.04 %	11322.99	3.3 %	11242.90	2.6 %
4	50	10	40	1061.22		1067.10	0.5 %	1198.49	12.9 %	1144.62	7.9 %
4	50	20	80	2614.74		2622.79	0.3 %	2898.50	10.8 %	2833.69	8.4 %
4	50	30	120	4477.54		4485.56	0.2 %	4818.90	7.6 %	4745.67	5.9 %
4	50	60	240	10230.92		10237.72	0.7 %	10712.62	4.7 %	10630.77	3.9 %
4	100	10	40	633.23		638.19	0.8 %	768.26	21.3 %	711.23	12.3 %
4	100	20	80	1998.84		2008.77	1.1 %	2247.32	34.6 %	2183.19	15.4 %
4	100	100	300	16206.85		Na	Na	12764.82	-21.2 %	12663.27	-21.8 %
4	200	50	150	7833.63		Na	Na	4434.14	-43.4 %	4256.74	-45.6 %

Cuadro 10.5: Metodologías vs MIP: función objetivo de solución escenario optimista

---

# Capítulo 11

## Conclusión

En esta investigación, se proponen dos modelos de optimización para la respuesta de un desastre natural. Los dos modelos tienen en común una función objetivo que considera prioridad o urgencia entre los puntos de demanda. La prioridad se incluye en la formulación de la función objetivo con el fin de guiar las decisiones de los dos modelos. Los modelos se destacan por su formulación lineal, lo que los permite ser aplicados en situaciones realistas y de gran escala.

Los dos modelos propuestos tienen ciertas características de aplicación que difieren entre sí. Por ejemplo, el modelo No.1 se caracteriza por ser un modelo estático y que determina las decisiones con respecto a la distribución de los bienes después de la ocurrencia del desastre natural. Este modelo se propone como estático para aquellos casos en los que el desastre natural no tenga repeticiones y las condiciones no cambien a través del tiempo. Además, este modelo No.1 se propone para situaciones en los que se pueda asumir la existencia de actividades de preparación previa a la ocurrencia del desastre natural, tal como actividades de pre-posicionamiento (estas actividades de preparación están fuera del alcance de esta tesis).

Por otro lado, el modelo No.2 se caracteriza por ser dinámico y determina las decisiones asociadas al empaque y la posterior distribución de los bienes de ayudas después de la ocurrencia del desastre natural. Este modelo pretende cerrar la brecha encontrada por [Altay y Green III \(2006\)](#) y [Galindo y Batta \(2013b\)](#), correspondiente a la disponibilidad inmediata de los bienes de ayuda, especialmente en los casos que no exista ningún tipo de preparación ante un desastre inminente. Además, el modelo

No.2 actualiza las decisiones teniendo en cuenta los cambios que pueden ocurrir en la demanda y las capacidades del sistema. Por ejemplo, desastres naturales con réplicas o nuevos eventos que cambian las condiciones del sistema.

El comportamiento de los modelos con respecto a la función objetivo, tiempo de solución y sus decisiones fue analizado con un caso de estudio y con experimentos computacionales ante escenarios aleatorios. Un resultado evidente del caso de estudio está relacionada con que el tiempo de respuesta del desastre natural es mayor si no se trabaja con el supuesto de la existencia de los inventario de los bienes de ayuda, como en el modelo No.2. En cuanto a la experiencia computacional, para cada modelo se realizó sus respectivos análisis de sensibilidad y se obtuvo como resultado que, a pesar de tener la misma función objetivo y gran cantidad de restricciones en común, el comportamiento de los modelos es completamente distinto ante diferentes parámetros. Por ejemplo, el parámetro que más influye con respecto a la función objetivo y el tiempo de solución en el modelo No.1 es el capital. Mientras tanto, el parámetro que más influye en el modelo No.2 es el número de personas trabajando en los centros de distribución.

Para resolver grandes instancias de los modelos o en los casos que no se pueden resolver en un tiempo razonable por causas asociadas a los parámetros influyentes se implementaron tres métodos alternativos de solución.

Las política de decisión para cada modelo se encuentra a continuación:

#### **Modelo No.1**

**Política No.1:** para modelos de pequeña escala con altos tiempos de solución, a causa del parámetro de capital, es recomendable limitar el tiempo de solución del problema entero completo.

**Política No.2:** para modelos de gran escala con altos tiempos de solución existen dos opciones: (i) escoger el método No.1 pues es el método dominante.

#### **Modelo No.2**

**Política No.1:** no se recomienda la metodología No.2 para ningún caso.

**Política No.2:** para problemas mayores de 100 *CDs* y 200 *PDs* ante escenarios pesimistas con  $\Lambda = 10$ , se recomienda el método No.1.

**Política No.3:** para problemas con 50 *CDs* y como máximo 120 *PDs* o problemas con 100 *CDs* y como máximo 80 *PDs* en escenarios optimistas con  $\Lambda = 50$ , se recomienda el método No.1.

**Política No.4:** en escenarios con 100 *CD* y más de 100 nodos se recomienda el método No.3 opción (B).

Cómo direcciones para futuras investigaciones se enuncian las siguientes:

- Continuar esfuerzos para el diseño de una metodología de solución para resolver largas instancias del problema. En este caso, se podría tratar un esquema de agregación para agregar nodos como en (Galindo y Batta, 2013a) o mejorar el comportamiento de la opción No.3.
- Incluir la posibilidad de realizar los empaques como actividad de preparación antes de que ocurra el desastre natural.
- Debido a que en nuestros modelos definimos períodos de decisión discretos preestablecidos, se utilizó una discretización de la función de costos de privación establecida por Holguín-Veras et al. (2013) y en Perez Rodriguez (2011). Sería valioso diseñar una metodología que admita una función de prioridad continua en el tiempo.
- Finalmente, sería interesante realizar un análisis más profundo en los acuerdos entre actores públicos y privados para tener disponibilidad de los inventarios de los productos de ayuda. En este caso, un posible enfoque sería el uso de Teoría de Juegos para analizar el problema en la perspectiva de un juego cooperativo.



# Apéndice A

## Tabla Taxonómica

Año y Autor	Preparación	Respuesta	Preparación y Respuesta	Entero	Lineal	Estocástico	Difuso	Dinámico	Otros	Exacto	Heurístico	Otro	Mono	Multi
(Batta y Man- nur, 1990)	X			X						X	X			
(Sherali et al., 1991)		X		X						X	X		X	
(Esogbue et al., 1992)	X			X			X	X		X				
(Brown y Vassi- liou, 1993)		X		X					X	X			X	
(Doerner et al., 2009)	X			X							X			

Sigue en la página siguiente.

Año y Autor	Preparación	Respuesta	Preparación y Respuesta	Entero	Lineal	Estocástico	Difuso	Dinámico	Otros	Exacto	Heurístico	Otro	Mono	Multi
(Haghani y Oh, 1996)		X		X							X		X	
(Fiedrich et al., 2000)		X		X				X			X		X	
(Bryson et al., 2002)	X			X							X			
(Barbarosoğlu et al., 2002)			X	X							X			X
(Barbarosoglu et al., 2004)		X		X		X				X			X	
(Özdamar et al., 2004)		X		X	X			X			X		X	
(Sheu et al., 2005)		X			X		X				X		X	
(Chen et al., 2007)			X	X							X		X	
(Akkihal, 2006)	X			X						X			X	
(McCall, 2006)			X										X	
(Dessouky et al., 2006)			X	X						X			X	

Sigue en la página siguiente.

Año y Autor	Preparación	Respuesta	Preparación y Respuesta	Entero	Lineal	Estocástico	Difuso	Dinámico	Otros	Exacto	Heurístico	Otro	Mono	Multi
(Beamon y Kotleba, 2006)		X			X	X					X			
(Jia et al., 2007)	X			X							X		X	
(Chang et al., 2007)	X			X		X				X			X	
(Clark y Culkin, 2013)		X												
(Gong y Batta, 2007)		X						X					X	
(Yi y Özdamar, 2007)		X		X				X			X		X	
(Yi y Kumar, 2007)		X		X		X					X		X	
(Chiu y Zheng, 2007)		X			X			X		X				
(Sheu, 2007)		X		X			X	X		X			X	X
(Nolz et al., 2007)		X		X							X			
(Tzeng et al., 2007)		X		X			X			X				X

Sigue en la página siguiente.

Año y Autor	Preparación	Respuesta	Preparación y Respuesta	Entero	Lineal	Estocástico	Difuso	Dinámico	Otros	Exacto	Heurístico	Otro	Mono	Multi
(Ukkusuri y Yushimito, 2008)	X					X					X		X	
(Balcik y Beamon, 2008)	X			X		X				X			X	
(Balcik et al., 2008)		X		X							X		X	
(Wang et al., 2008)		X		X				X		X			X	
(Jotshi et al., 2009)		X										X		
(Lodree Jr y Taskin, 2008)	X			X						X				
(Lodree y Taskin, 2009)	X					X					X	X		
(Yuan y Wang, 2009)		X		X							X		X	X
(Yan y Shih, 2009)		X												X
(Rawls y Turnquist, 2010)	X					X					X		X	

Sigue en la página siguiente.

Año y Autor	Preparación	Respuesta	Preparación y Respuesta	Entero	Lineal	Estocástico	Difuso	Dinámico	Otros	Exacto	Heurístico	Otro	Mono	Multi
(Blecken et al., 2010)	X			X						X	X		X	
(Mete y Zabinsky, 2010)			X			X				X				X
(Salmerón y Ap- te, 2010)			X			X								
(Yushimito et al., 2012)	X										X			
(Sheu, 2010)		X					X	X			X		X	
(Horner y Downs, 2010)			X							X			X	
(Campbell y Jo- nes, 2011)	X					X				X			X	
(Lin et al., 2011)		X		X							X			X
(Coles y Zhuang, 2011)														
(Bozorgi-Amiri et al., 2013)			X			X								X
(Bozorgi-Amiri et al., 2012)			X			X					X		X	
(Lin et al., 2012)		X		X							X		X	

Sigue en la página siguiente.

Año y Autor	Preparación	Respuesta	Preparación y Respuesta	Entero	Lineal	Estocástico	Difuso	Dinámico	Otros	Exacto	Heurístico	Otro	Mono	Multi
(Noyan, 2012)			X					X			X		X	
(Zhang et al., 2012)			X	X							X			
(Holguín-Veras y Jaller, 2011)	X								X			X		
(Berkoune et al., 2012)		X									X		X	
(Wohlgemuth et al., 2012)		X		X				X						
(Huang et al., 2012)		X		X							X			X
(Zhuang, 2012)		X							X					
(Bozkurt y Duran, 2012)	X												X	
(Sodhi y Tang, 2013)		X												
(Rekik et al., 2011)				X						X			X	
(Klibi et al., 2013)	X					X				X			X	

Sigue en la página siguiente.

Año y Autor	Preparación	Respuesta	Preparación y Respuesta	Entero	Lineal	Estocástico	Difuso	Dinámico	Otros	Exacto	Heurístico	Otro	Mono	Multi
(Davis et al., 2013)			X			X								
(Galindo y Batta, 2013a)	X			X						X			X	
(Holguín-Veras et al., 2013)		X										X	X	
(Chakravarty, 2014)			X						X			X		
(Zhan et al., 2014)		X		X							X			X
(Abounacer et al., 2014)		X		X							X			X
(Ahmadi et al., 2015)		X		X							X		X	
(Huang et al., 2015)		X				X	X	X			X			X
(Pérez-Rodríguez y Holguín-Veras, 2015)		X								X			X	
(Buzón-Cantera et al., 2015)		X		X							X		X	

Sigue en la página siguiente.

Año y Autor	Preparación	Respuesta	Preparación y Respuesta	Entero	Lineal	Estocástico	Difuso	Dinámico	Otros	Exacto	Heurístico	Otro	Mono	Multi
(Duhamel et al., 2016)		X		X				X			X	X	X	

Cuadro A.1: Clasificación Taxonómica.



---

## Apéndice B

### Datos de los parámetros caso de estudio

PRODUCTOS Kit 1	COST(\$)	PRODUCTOS Kit 2	COSTO (\$)
Azucar	5000	Pasta Dental	12000
Café	8600	Cepillo de diente	15000
Zaragoza	7200	comb	3000
Aceite	5800	Jabón de baño	7600
Leche	4400	Maquina de afeitar	5500
Lenteja	3800	Desodorante	8000
Harina de trigo	1500	Papel higiénico	11000
Panela	6100	Toallas higiénicas	12000
Atún	10250	Jabón de ropa	8000
Arroz	32652		
Chocolate	8118		
Sal	600		
Weath	1000		
Espagueti	4980		
TOTAL COST	100000	TOTAL COST	82100
PESO TOTAL	16,5 KG	PESO TOTAL	5 KG
COSTO PALET 1	\$1'100,000.00	COSTO PALET 2	\$821,000.00

Cuadro B.1: **KIT 1**: productos de comida no-perecedera y su costo. **KIT 2**: productos de higiene personal y su costo.

PUNTO DE DEMANDA	CIUDAD	DEMANDA DE PALET 1	DEMANDA DE PALET 2
PD5	Santa Lucia	215	235
PD4 / TP1	Suan	192	210
PD3	Campo de la Cruz	331	364
PD2	Candelaria	169	186
PD1	Manati	318	349

Cuadro B.2: Demanda de palets en cada nodo de demanda

Vehículo 1	PD4	PD3	PD2	PD1	PT1
CD1	210	200	220	200	210
CD2	100	100	120	100	100
CD3	110	100	120	110	110

Cuadro B.3: Costo de transporte desde CD i a PD j y PT c en vehículo tipo 1 (en unidades de mil)

Vehículo 2	PD4	PD3	PD2	PD1	PT1
CD1	160	150	170	150	160
CD2	80	70	90	70	80
CD3	80	70	90	70	80

Cuadro B.4: Costo de transporte desde CD i a PD j y PT c en vehículo tipo 2(en unidades de mil)

---

## Apéndice C

### Pruebas de experiencia computacional en modelo No.2

#### C.1. Pruebas MIP vs Tamaño

##### C.1.1. Tamaño vs Función objetivo

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
DC1	-5,26392	0,750704	-7,01198	0,0000
DP1	39,8729	0,319165	124,929	0,0000

##### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	6,77593E9	2	3,38796E9	15263,72	0,0000
Residuo	2,61915E7	118	221962,		
Total	6,80212E9	120			

R-cuadrada = 99,615 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,6117 porciento

Figura C.1: Anova Tamaño Vs Función objetivo

El modelo de regresión lineal múltiple que describe la relación entre la función objetivo 'FO1' y las dos variables independientes 'DC' y 'DP' es:  $FO1 = -5,26392 * DC1 + 39,8729 * DP1$ . Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA C.1 es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel

de confianza del 95,0 %. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 99,615 % de la variabilidad en FO1. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,6117 %.

### C.1.2. Tamaño vs Tiempo

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
DC1	5,93798	0,632998	9,38072	0,0000
DP1	0,840496	0,269122	3,1231	0,0023

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4,70181E7	2	2,35091E7	148,97	0,0000
Residuo	1,86221E7	118	157814,		
Total	6,56402E7	120			

R-cuadrada = 71,6301 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 71,3896 por ciento

Figura C.2: Anova Tamaño Vs Tiempo

El modelo de regresión lineal múltiple que describe la relación entre el tiempo de solución TIME1 y las dos variables independientes DC y DP es:  $TIME1 = 5,93798 * DC1 + 0,840496 * DP1$ . Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA C.2 es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0 %. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 71,6301 % de la variabilidad en TIME1. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 71,3896 %.

## C.2. Parámetros MIP vs Tamaño

### C.2.1. Inventario vs Tiempo

El modelo de regresión lineal múltiple que describe la relación entre el tiempo de solución TIME3 y la variable independiente %INV es:  $TIME3 = 20,3155 +$

**Coefficientes**

	<i>Minimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	20,3155	0,974104	20,8556	0,0000
Pendiente	0,469078	0,636791	0,736629	0,4625

**Análisis de Varianza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	39,6328	1	39,6328	0,54	0,4625
Residuo	10809,8	148	73,0395		
Total (Corr.)	10849,5	149			

Figura C.3: Anova nventario Vs Tiempo

0,469078 \* %INV. Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA C.3 es mayor que 0.05, no hay una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0 %.

### C.2.2. Inventario vs Función objetivo

**Coefficientes**

	<i>Minimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	1762,28	9,53735	184,777	0,0000
Pendiente	-7,32776	6,23475	-1,17531	0,2418

**Análisis de Varianza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	9671,79	1	9671,79	1,38	0,2418
Residuo	1,03625E6	148	7001,69		
Total (Corr.)	1,04592E6	149			

Figura C.4: Anova Inventario Vs Tiempo

El modelo de regresión lineal múltiple que describe la relación entre la función objetivo FO3 y las variable independiente %INV es:  $1762,28 - 7,32776 * \%INV$ . Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA C.4 es mayor que 0.05, no hay una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0 %.

**Coefficientes**

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	19,0935	0,977803	19,5269	0,0000
Pendiente	1,71378	0,639209	2,6811	0,0082

**Análisis de Varianza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	529,025	1	529,025	7,19	0,0082
Residuo	10892,1	148	73,5953		
Total (Corr.)	11421,1	149			

Figura C.5: Anova Inventario Vs Tiempo

### C.2.3. Capital vs Tiempo

El modelo de regresión lineal múltiple que describe la relación entre el tiempo de solución TIME2 y la variable independiente %BUDG es:  $TIME2 = 19,0935 + 1,71378 * \%BUDG$ . Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA C.5 es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0 %.

### C.2.4. Capital vs Función objetivo

**Coefficientes**

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	1792,86	11,0392	162,409	0,0000
Pendiente	-25,6782	7,21653	-3,55824	0,0005

**Análisis de Varianza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	118766,	1	118766,	12,66	0,0005
Residuo	1,3883E6	148	9380,41		
Total (Corr.)	1,50707E6	149			

Figura C.6: Anova Inventario Vs Función objetivo

El modelo de regresión lineal múltiple que describe la relación entre la función objetivo 'FO2' y la variable independiente %BUDG es:  $FO2 = 1792,86 - 25,6782 * \%BUDG$ . Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA C.6 es menor que 0.05, existe una

relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0 %.

### C.2.5. Mano de obra vs Tiempo

#### Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Pendiente	8,22011	0,818598	10,0417	0,0000

#### Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	2,60314E7	1	2,60314E7	100,84	0,0000
Residuo	2,81391E7	109	258157,		
Total	5,41705E7	110			

Figura C.7: Anova Mano de obra Vs Tiempo

El modelo de regresión lineal múltiple que describe la relación entre el tiempo de solución Tiempo y la variable independiente  $HW$  es:  $Tiempo = 8,22011 * HW$ . Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA C.7 es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0 %.

### C.2.6. Mano de obra vs Función objetivo

#### Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	1817,75	19,6452	92,5293	0,0000
Pendiente	-9,45829	0,331956	-28,4926	0,0000

#### Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	9,41355E6	1	9,41355E6	811,83	0,0000
Residuo	1,25231E6	108	11595,5		
Total (Corr.)	1,06659E7	109			

Figura C.8: Anova Mano de obra Vs Función objetivo

El modelo de regresión lineal que describe la relación entre la función objetivo FO y la variable independiente  $HW$  es:  $FO = 1817,75 - 9,45829 * HW$ . Puesto que

el valor-P en la tabla ANOVA C.8 es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0 %.

### C.2.7. Factores vs Función objetivo

**Análisis de Varianza para FO**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:A	87403,3	1	87403,3	5,33	0,0318
B:B	3,14436E7	1	3,14436E7	1917,97	0,0000
C:C	4,20382	1	4,20382	0,00	0,9874
D:D	29919,8	1	29919,8	1,83	0,1918
AB	3090,74	1	3090,74	0,19	0,6688
AC	37841,6	1	37841,6	2,31	0,1443
AD	21692,8	1	21692,8	1,32	0,2636
BC	2570,29	1	2570,29	0,16	0,6963
BD	16798,5	1	16798,5	1,02	0,3235
CD	29994,1	1	29994,1	1,83	0,1913
bloques	19929,6	1	19929,6	1,22	0,2833
Error total	327884,	20	16394,2		
Total (corr.)	3,20207E7	31			

Figura C.9: Anova Factores Vs Función objetivo

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de función objetivo en piezas separadas para cada uno de los efectos. Luego prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 %. Estos son el número de centros de distribución A y el número de puntos de demanda B. La prueba de falta de ajuste está diseñada para determinar si el modelo seleccionado es adecuado para describir los datos observados ó si se debería usar un modelo más complicado. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 98,976 % de la variabilidad en la función objetivo. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98,4128 %.



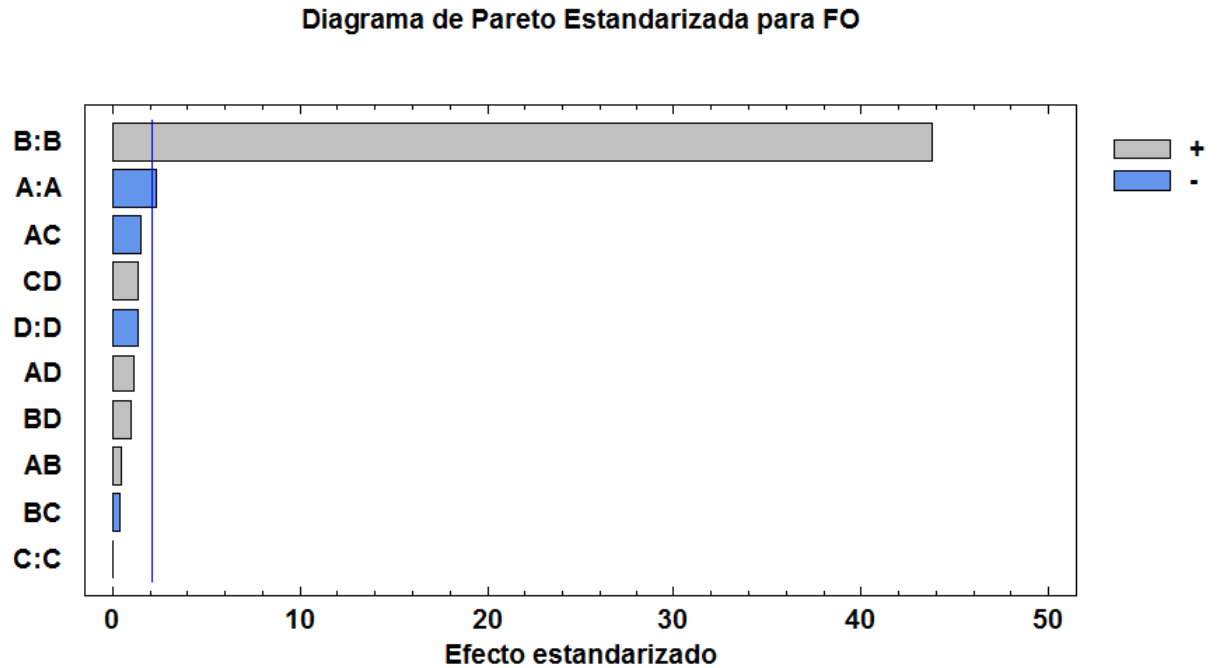


Figura C.10: Factores Vs Función objetivo

### C.2.8. Factores vs Tiempo

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de TIEMPO en piezas separadas para cada uno de los efectos. Luego prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 4 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 %. Estos son el número de centros de distribución A y el número de puntos de demanda B, la iteración AB y la iteración BD, pero como D no es un efecto significativo se descarta esta última. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 74,0811 % de la variabilidad en TIEMPO. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 59,8257 %.

**Análisis de Varianza para TIEMPO**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Factor_A	6917,09	1	6917,09	27,13	0,0000
B:Factor_B	2754,21	1	2754,21	10,80	0,0037
C:Factor_C	76,6724	1	76,6724	0,30	0,5895
D:Factor_D	38,2834	1	38,2834	0,15	0,7025
AB	2560,15	1	2560,15	10,04	0,0048
AC	137,229	1	137,229	0,54	0,4717
AD	74,0697	1	74,0697	0,29	0,5959
BC	24,5088	1	24,5088	0,10	0,7598
BD	1862,9	1	1862,9	7,31	0,0137
CD	13,1572	1	13,1572	0,05	0,8226
bloques	118,938	1	118,938	0,47	0,5025
Error total	5100,15	20	255,008		
Total (corr.)	19677,4	31			

Figura C.11: Anova Factores Vs Tiempo

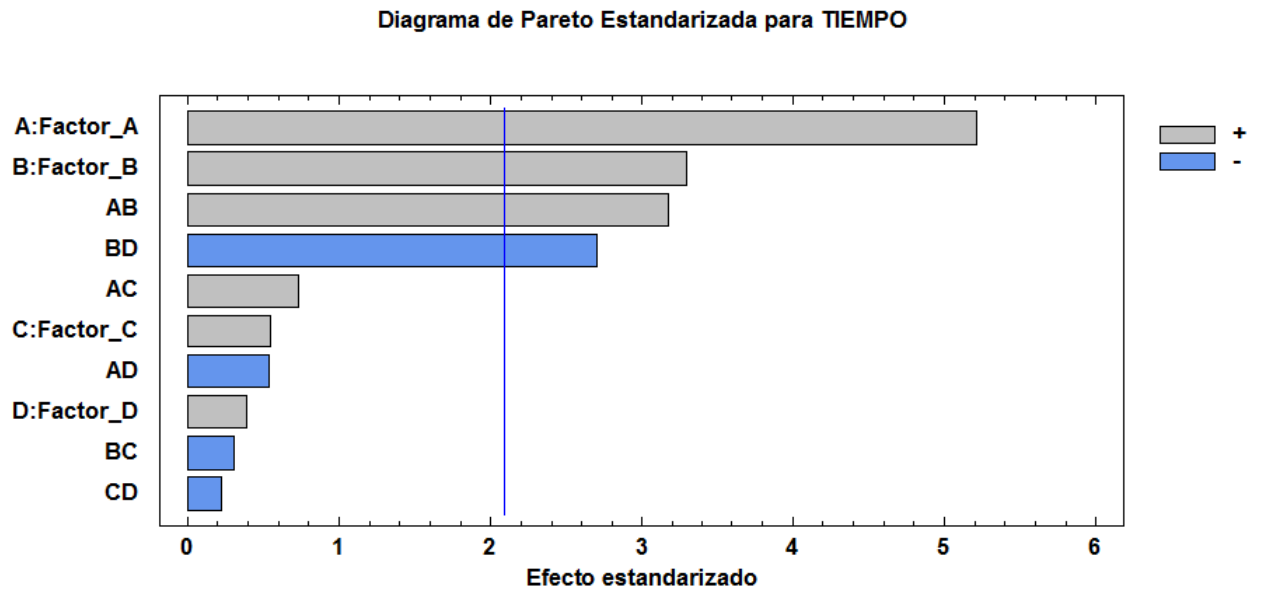


Figura C.12: Factores Vs Tiempo

---

## Apéndice D

### Calculo de variables de decisión

#### D.1. Método de solución No.3 en modelo No.1

- Si  $j$  es un punto de demanda no aislado, se usa un modelo para tomar las decisiones desde  $CD_i$  con vehículos regulares  $v$  hacia  $PD_j$  no aislado y con palet  $f$ . En este sentido, se considera que  $Q = Q_{vfit}$  y  $X = X_{vjt}$ .

$$Z_{max}Q - X \quad (D.1)$$

$$G_f * Q + A_{vij} * X \leq N_t \quad (D.2)$$

$$\xi_{ij} * X \leq W_t * \eta_{iv} \quad (D.3)$$

$$\rho_f * Q \leq \Phi_v * X \quad (D.4)$$

$$\omega_f * Q \leq \Omega_v * X \quad (D.5)$$

$$Q \leq \min(\gamma_{fit}, \theta_{fjt}) \quad (D.6)$$

La ecuación D.25 es la función objetivo en el segundo modelo y considera enviar la máxima cantidad de palets en el mínimo número de viajes. La ecuación D.26 garantiza que los costos incurridos por el número de palets y viajes, no excedan el capital disponible. La ecuación D.27 se refiere al tiempo disponible. La ecuación D.28 y la ecuación D.29 se refieren a las capacidades de volumen y peso de los vehículos regulares. Finalmente, la ecuación D.30 limita la cantidad de palets dependiendo de la demanda o el inventario disponible.

- Si  $j$  es un punto de demanda aislado, se usa el modelo de decisión desde  $CD_i$  con vehículos  $v$  hacia el  $DP_j$  aislado y palet  $f$ , usando  $TP_c$  en vehículos especiales  $b$ . Se establece que  $U = U_{vfict}$ ,  $R = R_{vict}$ ,  $Y = Y_{bfct}$ , y  $Z = Z_{bfct}$ .

$$Z_{max}Y + U - Z - R - I \quad (D.7)$$

$$G_f * U + C_{vic} * R + E_{bcj} * Z \leq N_t \quad (D.8)$$

$$\varepsilon_{ic} * R \leq W_t * \eta_{iv} \quad (D.9)$$

$$\varrho_{cj} * Z \leq W_t * \zeta_{cb} \quad (D.10)$$

$$\rho_f * U \leq \Phi_v * R \quad (D.11)$$

$$\omega_f * U \leq \Omega_v * R \quad (D.12)$$

$$\rho_f * Y \leq \Upsilon_b * Z \quad (D.13)$$

$$\omega_f * Y \leq \Psi_b * Z \quad (D.14)$$

$$U \leq \min(\gamma_{fit}, \theta_{fjt}) \quad (D.15)$$

$$I = U - Y \quad (D.16)$$

$$Y \leq \min(I_{fct}, \theta_{fjt}) \quad (D.17)$$

La ecuación D.31 es la función objetivo en el tercer modelo y considera enviar la máxima cantidad de palets en el mínimo número de viajes. La ecuación D.32 garantiza que los costos incurridos por el número de palets y viajes, no excedan el capital disponible. Las ecuaciones D.33 y D.34 se refieren al tiempo disponible, desde el CD y el PT. Las ecuaciones D.35 y D.36 se refieren a las capacidades de volumen y peso de los vehículos regulares, y las D.37 y D.38 para los vehículos especiales. La ecuación D.39 limita la cantidad de palets a enviar desde el  $CD$  al  $PT$ , dependiendo del mínimo entre la demanda o el inventario disponible. La ecuación D.40 actualiza el nivel de inventario en el PT y finalmente la ecuación D.41 limita la cantidad de palets a enviar desde el  $PT$  al  $DP$ , dependiendo de la demanda o el inventario disponible.

## D.2. Método de solución No.3 en modelo No.2

### D.2.1. Opción A: tres modelos

- Primero, se obtienen las cantidad de kits a empacar  $qk = q_{kit}$ , la cantidad de palets a empacar  $qf = p_{fit}$ , la cantidad de mano de obra a contratar para realizar kits  $wh = H_{it}$  y la cantidad de mano de obra a contratar para realizar palets  $wl = L_{it}$ . Además se actualizan los inventarios de productos, kits y palets.

$$Z_{max}qk + qf - wh - wl \quad (D.18)$$

$$O * (wh + wl) \leq N_t \quad (D.19)$$

$$\Sigma_{kp} * qk \leq PI_{pit} \quad (D.20)$$

$$KI_{pit} = qk - \varrho_{fk} * qf \quad (D.21)$$

$$qk \leq \Upsilon * wh \quad (D.22)$$

$$qf \leq \lambda * wl \quad (D.23)$$

$$wh + wl \leq S_i \quad (D.24)$$

La ecuación D.18, es la función objetivo y considera empacar la máxima cantidad de kits y palets, usando la mínima cantidad de recursos humanos, cumpliendo con un conjunto de restricciones. En la ecuación D.19 se garantiza que el costo causado por la cantidad de recursos humanos a contratar no exceda el capital disponible. La ecuación D.20 no permite empacar más kits de lo que permita el nivel de inventario de productos. La ecuación D.21 actualiza el inventario de kits. Además, la ecuación D.22 y la ecuación D.23 garantizan no exceder la capacidad de empaque disponible, para kit y palets respectivamente. Finalmente, la ecuación D.24 no permite contratar más mano de obra que la cantidad disponible. Todas las variables son enteras y el inventario de palets resultante, es el número de palets empacadas.

- Si  $j$  es un punto de demanda no aislado, se usa un modelo para tomar las decisiones desde  $CD_i$  con vehículos regulares  $v$  hacia  $PD_j$  no aislado y con

palet  $f$ . En este sentido, se considera que  $Q = Q_{vfi jt}$  y  $X = X_{vij t}$ .

$$Z_{max}Q - X \quad (D.25)$$

$$G_f * Q + A_{vij} * X \leq N_t \quad (D.26)$$

$$\xi_{ij} * X \leq W_t * \eta_{iv} \quad (D.27)$$

$$\rho_f * Q \leq \Phi_v * X \quad (D.28)$$

$$\omega_f * Q \leq \Omega_v * X \quad (D.29)$$

$$Q \leq \min(\gamma_{fit}, \theta_{fjt}) \quad (D.30)$$

La ecuación D.25 es la función objetivo en el segundo modelo y considera enviar la máxima cantidad de palets en el mínimo número de viajes. La ecuación D.26 garantiza que los costos incurridos por el número de palets y viajes, no excedan el capital disponible. La ecuación D.27 se refiere al tiempo disponible. La ecuación D.28 y la ecuación D.29 se refieren a las capacidades de volumen y peso de los vehículos regulares. Finalmente, la ecuación D.30 limita la cantidad de palets dependiendo de la demanda o el inventario disponible.

- Si  $j$  es un punto de demanda aislado, se usa el modelo de decisión desde  $CD_i$  con vehículos  $v$  hacia el  $DP_j$  aislado y palet  $f$ , usando  $TP_c$  en vehículos especiales

b. Se establece que  $U = U_{vict}$ ,  $R = R_{vict}$ ,  $Y = Y_{bfct}$ , y  $Z = Z_{bfct}$ .

$$Z_{max}Y + U - Z - R - I \quad (D.31)$$

$$G_f * U + C_{vic} * R + E_{bcj} * Z \leq N_t \quad (D.32)$$

$$\varepsilon_{ic} * R \leq W_t * \eta_{iv} \quad (D.33)$$

$$\varrho_{cj} * Z \leq W_t * \zeta_{cb} \quad (D.34)$$

$$\rho_f * U \leq \Phi_v * R \quad (D.35)$$

$$\omega_f * U \leq \Omega_v * R \quad (D.36)$$

$$\rho_f * Y \leq \Upsilon_b * Z \quad (D.37)$$

$$\omega_f * Y \leq \Psi_b * Z \quad (D.38)$$

$$U \leq \min(\gamma_{fit}, \theta_{fjt}) \quad (D.39)$$

$$I = U - Y \quad (D.40)$$

$$Y \leq \min(I_{fct}, \theta_{fjt}) \quad (D.41)$$

La ecuación D.31 es la función objetivo en el tercer modelo y considera enviar la máxima cantidad de palets en el mínimo número de viajes. La ecuación D.32 garantiza que los costos incurridos por el número de palets y viajes, no excedan el capital disponible. Las ecuaciones D.33 y D.34 se refieren al tiempo disponible, desde el CD y el PT. Las ecuaciones D.35 y D.36 se refieren a las capacidades de volumen y peso de los vehículos regulares, y las D.37 y D.38 para los vehículos especiales. La ecuación D.39 limita la cantidad de palets a enviar desde el CD al PT, dependiendo del mínimo entre la demanda o el inventario disponible. La ecuación D.40 actualiza el nivel de inventario en el PT y finalmente la ecuación D.41 limita la cantidad de palets a enviar desde el PT al DP, dependiendo de la demanda o el inventario disponible.

### D.2.2. Opción B: dos modelos

- Si  $j$  es un punto de demanda aislado, se usa el modelo de decisión desde  $CD_i$  con vehículos  $v$  hacia el  $DP_j$  aislado y palet  $f$ , usando  $TP_c$  en vehículos especiales b. Se establece que  $U = U_{vict}$ ,  $R = R_{vict}$ ,  $Y = Y_{bfct}$ , y  $Z = Z_{bfct}$ , además se obtienen las cantidad de kits a empacar  $qk = q_{kit}$ , la cantidad de palets

a empacar  $qf = p_{fit}$ , la cantidad de mano de obra a contratar para realizar kits  $wh = H_{it}$  y la cantidad de mano de obra a contratar para realizar palets  $wl = L_{it}$ . Además se actualizan los inventarios de productos, kits y palets. Este modelo combina los modelos 1 y 2 de la opción A, mencionada anteriormente.

$$Z_{max}Q - X + qk + qf - wh - wl \quad (D.42)$$

$$G_f * Q + A_{vij} * X + O * (wh + wl) \leq N_t \quad (D.43)$$

$$\xi_{ij} * X \leq W_t * \eta_{iv} \quad (D.44)$$

$$\rho_f * Q \leq \Phi_v * X \quad (D.45)$$

$$\omega_f * Q \leq \Omega_v * X \quad (D.46)$$

$$Q \leq \min(qf, \theta_{fjt}) \quad (D.47)$$

$$\Sigma_{kp} * qk \leq PI_{pit} \quad (D.48)$$

$$KI_{pit} = qk - \varrho_{fk} * qf \quad (D.49)$$

$$qk \leq \Upsilon * wh \quad (D.50)$$

$$qf \leq \lambda * wl \quad (D.51)$$

$$wh + wl \leq S_i \quad (D.52)$$

La ecuación D.42 es la función objetivo en el primer modelo y considera enviar la máxima cantidad de palets en el mínimo número de viajes, además considera empacar la máxima cantidad de kits y palets, usando la mínima cantidad de recursos humano. La ecuación D.43 garantiza que los costos incurridos por el número de palets y viajes y el costo causado por la cantidad de recursos humanos a contratar, no excedan el capital disponible. La ecuación D.44 se refiere al tiempo disponible. La ecuación D.45 y la ecuación D.46 se refieren a las capacidades de volumen y peso de los vehículos regulares. La ecuación D.47 limita la cantidad de palets dependiendo de la demanda o el inventario disponible dado por la cantidad de palets empacados. La ecuación D.48 no permite empacar más kits que lo que permita el nivel de inventario de productos dentro de cada kit. La ecuación D.49 actualiza el inventario de kits. Además, la ecuación D.50 y la ecuación D.51 garantizan no exceder la capacidad de empaque disponible, para kit y palets respectivamente. Finalmente, la ecuación



D.52 no permite contratar más mano de obra que la cantidad disponible. Todas las variables son enteras y el inventario de palets resultante, es el número de palets empacadas.

- Si  $j$  es un punto de demanda aislado, se usa el modelo de decisión desde  $CD_i$  con vehículos  $v$  hacia el  $DP_j$  aislado y palet  $f$ , usando  $TP_c$  en vehículos especiales  $b$ . Se establece que  $U = U_{vfict}$ ,  $R = R_{vict}$ ,  $Y = Y_{bfcjt}$ , y  $Z = Z_{bcjt}$ . Además se obtienen las cantidad de kits a empacar  $qk = q_{kit}$ , la cantidad de palets a empacar  $qf = p_{fit}$ , la cantidad de mano de obra a contratar para realizar kits  $wh = H_{it}$  y la cantidad de mano de obra a contratar para realizar palets  $wl = L_{it}$ . Además se actualizan los inventarios de productos, kits y palets. Este modelo combina los modelos 1 y 3 de la opción 1 mencionada anteriormente.

$$Z_{max}Y + U - Z - R - I + qk + qf - wh - wl \quad (D.53)$$

$$G_f * U + C_{vic} * R + E_{bcj} * Z + O * (wh + wl) \leq N_t \quad (D.54)$$

$$\varepsilon_{ic} * R \leq W_t * \eta_{iv} \quad (D.55)$$

$$\varrho_{cj} * Z \leq W_t * \zeta_{cb} \quad (D.56)$$

$$\rho_f * U \leq \Phi_v * R \quad (D.57)$$

$$\omega_f * U \leq \Omega_v * R \quad (D.58)$$

$$\rho_f * Y \leq \Upsilon_b * Z \quad (D.59)$$

$$\omega_f * Y \leq \Psi_b * Z \quad (D.60)$$

$$U \leq \min(qf, \theta_{fjt}) \quad (D.61)$$

$$I = U - Y \quad (D.62)$$

$$Y \leq \min(I_{fct}, \theta_{fjt}) \Sigma_{kp} * qk \leq PI_{pit} \quad (D.63)$$

$$KI_{pit} = qk - \varrho_{fk} * qf \quad (D.64)$$

$$qk \leq \Upsilon * wh \quad (D.65)$$

$$qf \leq \lambda * wl \quad (D.66)$$

$$wh + wl \leq S_i \quad (D.67)$$

La ecuación D.53 es la función objetivo en el segundo modelo y considera enviar la máxima cantidad de palets en el mínimo número de viajes, además considera

empacar la máxima cantidad de kits y palets, usando la mínima cantidad de recursos humano. La ecuación D.54 garantiza que los costos incurridos por el número de palets y viajes y el costo causado por la cantidad de recursos humanos a contratar, no excedan el capital disponible. Las ecuaciones D.55 y D.56 se refieren al tiempo disponible, desde el CD y el PT. Las ecuaciones D.57 y D.58 se refieren a las capacidades de volumen y peso de los vehículos regulares, y las D.59 y D.60 para los vehículos especiales. La ecuación D.61 limita la cantidad de palets a enviar desde el *CD* al *PT*, dependiendo de la demanda o el inventario disponible, dado por la cantidad de palets empacados. La ecuación D.62 actualiza el nivel de inventario en el PT y finalmente la ecuación D.63 limita la cantidad de palets a enviar desde el *PT* al *DP*, dependiendo de la demanda o el inventario disponible. La ecuación D.63 no permite empacar más kits que lo que permita el nivel de inventario de productos dentro de cada kit. La ecuación D.64 actualiza el inventario de kits. Además, la ecuación D.65 y la ecuación D.66 garantizan no exceder la capacidad de empaque disponible, para kit y palets respectivamente. Finalmente, la ecuación D.67 no permite contratar más mano de obra que la cantidad disponible. Todas las variables son enteras y el inventario de palets resultante, es el número de palets empacadas.

---

## Bibliografía

Registro unico de damnificados departamento administrativo nacional de estadística. Available from: [:https://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/registro-unico-de-damnificados-por-la-emergencia-invernal-reunidos](https://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/registro-unico-de-damnificados-por-la-emergencia-invernal-reunidos). [Accessed: 2014-01-30].

Rachida Abounacer, Monia Rekik, y Jacques Renaud. An exact solution approach for multi-objective location–transportation problem for disaster response. *Computers & Operations Research*, 41:83–93, 2014.

Morteza Ahmadi, Abbas Seifi, y Behnam Tootooni. A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on san francisco district. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75:145–163, 2015.

Anup Roop Akkihal. *Inventory pre-positioning for humanitarian operations*. Tesis Doctoral, Massachusetts Institute of Technology, 2006.

Nezih Altay y Walter G Green III. Or/ms research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175(1):475–493, 2006.

Burcu Balcik y Benita M Beamon. Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics*, 11(2):101–121, 2008.

Burcu Balcik, Benita M Beamon, y Karen Smilowitz. Last mile distribution in humanitarian relief. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 12(2):51–63, 2008.

- G Barbarosoglu et al. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response. *Journal of the Operational Research Society*, 55(1):43–53, 2004.
- Gülay Barbarosoğlu, Linet Özdamar, y Ahmet Cevik. An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations. *European Journal of Operational Research*, 140(1):118–133, 2002.
- Rajan Batta y Narasimha R Mannur. Covering-location models for emergency situations that require multiple response units. *Management science*, 36(1):16–23, 1990.
- Benita M Beamon y Stephen A Kotleba. Inventory modelling for complex emergencies in humanitarian relief operations. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 9(1):1–18, 2006.
- Djamel Berkoune, Jacques Renaud, Monia Rekik, y Angel Ruiz. Transportation in disaster response operations. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1):23–32, 2012.
- Dimitris Bertsimas, Vivek F Farias, y Nikolaos Trichakis. The price of fairness. *Operations research*, 59(1):17–31, 2011.
- Alexander Blecken, Christoph Danne, Wilhelm Dangelmaier, Beate Rottkemper, y Bernd Hellingrath. Optimal stock relocation under uncertainty in post-disaster humanitarian operations. En *System Sciences (HICSS), 2010 43rd Hawaii International Conference on*, págs. 1–10. IEEE, 2010.
- Melda Bozkurt y Serhan Duran. Effects of natural disaster trends: a case study for expanding the pre-positioning network of care international. *International journal of environmental research and public health*, 9(8):2863–2874, 2012.
- Ali Bozorgi-Amiri, Mohammad Saeid Jabalameli, Mehdi Alinaghian, y Mahdi Heydari. A modified particle swarm optimization for disaster relief logistics under uncertain environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(1-4):357–371, 2012.

- Ali Bozorgi-Amiri, MS Jabalameli, y SMJ Mirzapour Al-e Hashem. A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. *OR spectrum*, 35(4):905–933, 2013.
- Gerald G Brown y Antonios L Vassiliou. Optimizing disaster relief: real-time operational and tactical decision support. Inf. téc., DTIC Document, 1993.
- Kweku-Muata Noel Bryson, Harvey Millar, Anito Joseph, y Ayodele Mobolurin. Using formal ms/or modeling to support disaster recovery planning. *European Journal of Operational Research*, 141(3):679–688, 2002.
- Ivo Erasmo Buzón-Cantera, Jaime Mora-Vargas, Angel Ruiz, y Patrick Soriano. A hybrid optimization model: An approach for the humanitarian aid distribution problem. *Applied Mathematical Sciences*, 9(127):6329–6346, 2015.
- Ann Melissa Campbell y Philip C Jones. Prepositioning supplies in preparation for disasters. *European Journal of Operational Research*, 209(2):156–165, 2011.
- Aakil M Caunhye, Xiaofeng Nie, y Shaligram Pokharel. Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1):4–13, 2012.
- Amiya K Chakravarty. Humanitarian relief chain: Rapid response under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 151:146–157, 2014.
- Mei-Shiang Chang, Ya-Ling Tseng, y Jing-Wen Chen. A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6):737–754, 2007.
- Anthony Chen, Chao Yang, Sirisak Kongsomsaksakul, y Ming Lee. Network-based accessibility measures for vulnerability analysis of degradable transportation networks. *Networks and Spatial Economics*, 7(3):241–256, 2007.
- Yi-Chang Chiu y Hong Zheng. Real-time mobilization decisions for multi-priority emergency response resources and evacuation groups: model formulation and so-

- lution. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6):710–736, 2007.
- Alistair Clark y Bernadette Culkin. A network transshipment model for planning humanitarian relief operations after a natural disaster. En *Decision Aid Models for Disaster Management and Emergencies*, págs. 233–257. Springer, 2013.
- John Coles y Jun Zhuang. Decisions in disaster recovery operations: a game theoretic perspective on organization cooperation. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 8(1), 2011.
- Lauren B Davis, Funda Samanlioglu, Xiuli Qu, y Sarah Root. Inventory planning and coordination in disaster relief efforts. *International Journal of Production Economics*, 141(2):561–573, 2013.
- Luis E De la Torre, Irina S Dolinskaya, y Karen R Smilowitz. Disaster relief routing: Integrating research and practice. *Socio-economic planning sciences*, 46(1):88–97, 2012.
- Maged Dessouky, Fernando Ordonez, Hongzhong Jia, y Zhihong Shen. Rapid distribution of medical supplies. En *Patient Flow: Reducing Delay in Healthcare Delivery*, págs. 309–338. Springer, 2006.
- Karl F Doerner, Walter J Gutjahr, y Pamela C Nolz. Multi-criteria location planning for public facilities in tsunami-prone coastal areas. *Or Spectrum*, 31(3):651–678, 2009.
- Christophe Duhamel, Andréa Cynthia Santos, Daniel Brasil, Eric Châtelet, y Babiga Birregah. Connecting a population dynamic model with a multi-period location-allocation problem for post-disaster relief operations. *Annals of Operations Research*, págs. 1–21, 2016.
- Serhan Duran, Özlem Ergun, Pınar Keskinocak, y Julie L Swann. Humanitarian logistics: advanced purchasing and pre-positioning of relief items. En *Handbook of Global Logistics*, págs. 447–462. Springer, 2013.

Augustine O Esogbue, Maria Theologidu, y Kejiao Guo. On the application of fuzzy sets theory to the optimal flood control problem arising in water resources systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 48(2):155–172, 1992.

Real Academia Española. *Real academia española*. Perlado, Páez, 1952.

Frank Fiedrich, Fritz Gehbauer, y U Rickers. Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters. *Safety science*, 35(1):41–57, 2000.

Gina Galindo y Rajan Batta. Prepositioning of supplies in preparation for a hurricane under potential destruction of prepositioned supplies. *Socio-Economic Planning Sciences*, 47(1):20–37, 2013a.

Gina Galindo y Rajan Batta. Review of recent developments in or/ms research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 230(2):201–211, 2013b.

Qiang Gong y Rajan Batta. Allocation and reallocation of ambulances to casualty clusters in a disaster relief operation. *IIE Transactions*, 39(1):27–39, 2007.

D Guha-Sapir, P Hoyois, y R Below. Annual disaster statistical review 2013: the numbers and trends [internet]. brussels: Center for research on the epidemiology of disaster; c2014 [cited 2015 april 29].

Ali Haghani y Sei-Chang Oh. Formulation and solution of a multi-commodity, multi-modal network flow model for disaster relief operations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 30(3):231–250, 1996.

Dorothea Hilhorst. Dead letter or living document? ten years of the code of conduct for disaster relief. *Disasters*, 29(4):351–369, 2005.

F Hillier y G Lieberman. Investigación de operaciones. 7 edición. ed. 2002.

José Holguín-Veras y Miguel Jaller. Immediate resource requirements after hurricane katrina. *Natural Hazards Review*, 13(2):117–131, 2011.

- José Holguín-Veras, Noel Pérez, Miguel Jaller, Luk N Van Wassenhove, y Felipe Aros-Vera. On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models. *Journal of Operations Management*, 31(5):262–280, 2013.
- Mark W Horner y Joni A Downs. Optimizing hurricane disaster relief goods distribution: model development and application with respect to planning strategies. *Disasters*, 34(3):821–844, 2010.
- Steven Horwitz. Wal-mart to the rescue: private enterprise’s response to hurricane katrina. *The Independent Review*, 13(4):511–528, 2009.
- Kai Huang, Yiping Jiang, Yufei Yuan, y Lindu Zhao. Modeling multiple humanitarian objectives in emergency response to large-scale disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75:1–17, 2015.
- Michael Huang, Karen Smilowitz, y Burcu Balcik. Models for relief routing: Equity, efficiency and efficacy. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 48(1):2–18, 2012.
- Hongzhong Jia, Fernando Ordóñez, y Maged Dessouky. A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies. *IIE transactions*, 39(1):41–55, 2007.
- Arun Jotshi, Qiang Gong, y Rajan Batta. Dispatching and routing of emergency vehicles in disaster mitigation using data fusion. *Socio-Economic Planning Sciences*, 43(1):1–24, 2009.
- Jan Kellett y Dan Sparks. Disaster risk reduction: Spending where it should count. *Development Alternatives*, March, 2012.
- Walid Klibi, Soumia Ichoua, y Alain Martel. *Prepositioning emergency supplies to support disaster relief: a stochastic programming approach*. Faculté des sciences de l’administration, Université Laval, 2013.
- Yen-Hung Lin, R Batta, PA Rogerson, A Blatt, y M Flanigan. A logistics model for delivery of critical items in a disaster relief operation: heuristic approaches. *Transportation Research Part E*, 2009a.



- Yen-Hung Lin, Rajan Batta, Peter A Rogerson, Alan Blatt, y Marie Flanigan. Application of a humanitarian relief logistics model to an earthquake disaster. *Word Journal of the International Linguistic Association*, págs. 1–14, 2009b.
- Yen-Hung Lin, Rajan Batta, Peter A Rogerson, Alan Blatt, y Marie Flanigan. A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster. *Socio-Economic Planning Sciences*, 45(4):132–145, 2011.
- Yen-Hung Lin, Rajan Batta, Peter A Rogerson, Alan Blatt, y Marie Flanigan. Location of temporary depots to facilitate relief operations after an earthquake. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(2):112–123, 2012.
- Emmett J Lodree y Selda Taskin. Supply chain planning for hurricane response with wind speed information updates. *Computers & Operations Research*, 36(1):2–15, 2009.
- Emmett J Lodree Jr y Selda Taskin. An insurance risk management framework for disaster relief and supply chain disruption inventory planning. *Journal of the Operational Research Society*, 59(5):674–684, 2008.
- Emma L Maspero y Hans W Ittmann. Rise of humanitarian logistics. 2008.
- Valerie M McCall. Designing and pre-positioning humanitarian assistance pack-up kits (ha puks) to support pacific fleet emergency relief operations. Inf. téc., DTIC Document, 2006.
- David McLoughlin. A framework for integrated emergency management. *Public Administration Review*, págs. 165–172, 1985.
- Huseyin Onur Mete y Zelda B Zabinsky. Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management. *International Journal of Production Economics*, 126(1):76–84, 2010.
- Pamela C Nolz, Karl F Doerner, Walter J Gutjahr, y Richard F Hartl. Modelling disaster relief operations as covering tour problem. *Austrian Science Fund (FWF)*, 2007.

- Nilay Noyan. Risk-averse two-stage stochastic programming with an application to disaster management. *Computers & Operations Research*, 39(3):541–559, 2012.
- Linnet Özdamar y Onur Demir. A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief logistics planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(3):591–602, 2012.
- Linnet Özdamar, Ediz Ekinici, y Beste Küçükyazici. Emergency logistics planning in natural disasters. *Annals of operations research*, 129(1-4):217–245, 2004.
- Noel Perez Rodriguez. *Inventory allocation models for post-disaster humanitarian logistics with explicit consideration of deprivation costs*. Tesis Doctoral, Rensselaer Polytechnic Institute, 2011.
- Noel Pérez-Rodríguez y José Holguín-Veras. Inventory-allocation distribution models for postdisaster humanitarian logistics with explicit consideration of deprivation costs. *Transportation Science*, 2015.
- Carmen G Rawls y Mark A Turnquist. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response. *Transportation research part B: Methodological*, 44(4):521–534, 2010.
- Monia Rekik, Angel Ruiz, Jacques Renaud, y Djamel Berkoune. *A decision support system for distribution network design for disaster response*. Faculté des sciences de l'administration, Université Laval, 2011.
- Monia Rekik, Angel Ruiz, Jacques Renaud, Djamel Berkoune, y Sébastien Paquet. A decision support system for humanitarian network design and distribution operations. En *Humanitarian and Relief Logistics*, págs. 1–20. Springer, 2013.
- Beate Rottkemper, Kathrin Fischer, y Alexander Blecken. A transshipment model for distribution and inventory relocation under uncertainty in humanitarian operations. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1):98–109, 2012.
- Javier Salmerón y Aruna Apte. Stochastic optimization for natural disaster asset prepositioning. *Production and Operations Management*, 19(5):561–574, 2010.

- Hanif D Sherali, Todd B Carter, y Antoine G Hobeika. A location-allocation model and algorithm for evacuation planning under hurricane/flood conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(6):439–452, 1991.
- Jiuh-Biing Sheu. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6):687–709, 2007.
- Jiuh-Biing Sheu. Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(1):1–17, 2010.
- Jiuh-Biing Sheu, Yen-Heng Chen, Lawrence W Lan, et al. A novel model for quick response to disaster relief distribution. En *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, tomo 5, págs. 2454–2462. 2005.
- ManMohan S Sodhi y Christopher S Tang. Buttressing supply chains against floods in asia for humanitarian relief and economic recovery. *Production and Operations Management*, 2013.
- Gwo-Hshiung Tzeng, Hsin-Jung Cheng, y Tsung Dow Huang. Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6):673–686, 2007.
- Satish Ukkusuri y Wilfredo Yushimito. Location routing approach for the humanitarian prepositioning problem. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2089):18–25, 2008.
- Shaoren Wang, Zujun Ma, y Zhouqing Li. A dynamic programming model for optimal transportation of emergency relief commodities in natural disasters. En *Logistics@The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China*, págs. 1452–1457. ASCE, 2008.
- Sascha Wohlgemuth, Richard Oloruntoba, y Uwe Clausen. Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(4):261–271, 2012.

- Shangyao Yan y Yu-Lin Shih. Optimal scheduling of emergency roadway repair and subsequent relief distribution. *Computers & Operations Research*, 36(6):2049–2065, 2009.
- Wei Yi y Arun Kumar. Ant colony optimization for disaster relief operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6):660–672, 2007.
- Wei Yi y Linet Özdamar. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*, 179(3):1177–1193, 2007.
- Yuan Yuan y Dingwei Wang. Path selection model and algorithm for emergency logistics management. *Computers & Industrial Engineering*, 56(3):1081–1094, 2009.
- Wilfredo F Yushimito, Miguel Jaller, y Satish Ukkusuri. A voronoi-based heuristic algorithm for locating distribution centers in disasters. *Networks and Spatial Economics*, 12(1):21–39, 2012.
- Sha-lei Zhan, Nan Liu, y Yong Ye. Coordinating efficiency and equity in disaster relief logistics via information updates. *International Journal of Systems Science*, 45(8):1607–1621, 2014.
- Jiang-Hua Zhang, Jin Li, y Zhi-Ping Liu. Multiple-resource and multiple-depot emergency response problem considering secondary disasters. *Expert Systems with Applications*, 39(12):11066–11071, 2012.
- Jun Zhuang. Innovations in game theoretic modeling for terrorism and natural disasters. 2012.